

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
UNIOESTE - CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DESENVOLVIMENTO E MODELAGEM DE UM CONTROLADOR
FUZZY TAKAGI-SUGENO TOLERANTE A FALTAS APLICADO EM
VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS**

EDUARDO ATTUY CARVALHO

FOZ DO IGUAÇU

2018

Eduardo Attuy Carvalho

**DESENVOLVIMENTO E MODELAGEM DE UM CONTROLADOR
FUZZY TAKAGI-SUGENO TOLERANTE A FALTAS APLICADO EM
VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual do Oeste do Paraná como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e Computação. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Foz do Iguaçu

2018

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Carvalho, Eduardo Attuy

Desenvolvimento e modelagem de um controlador fuzzy Takagi-Sugeno tolerante a faltas aplicado em veículos subaquáticos não tripulados / Eduardo Attuy Carvalho; orientador(a), Carlos Henrique Farias dos Santos, 2018. 136 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Graduação em Engenharia Mecânica Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, 2018.

1. Veículos subaquáticos autônomos. 2. Lógica fuzzy. 3. Controle tolerante a faltas. I. Santos, Carlos Henrique Farias dos. II. Título.

DESENVOLVIMENTO E MODELAGEM DE UM CONTROLADOR FUZZY TAKAGI-SUGENO TOLERANTE A FALTAS APLICADO EM VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS

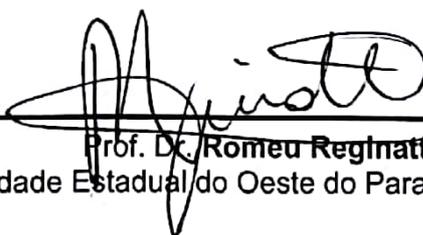
Eduardo Attuy Carvalho

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora:

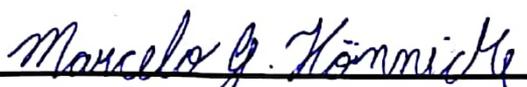
Data da defesa pública: 03/08/2018



Prof. Dr. **Carlos Henrique Farias dos Santos** - (Orientador)
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



Prof. Dr. **Romeu Reginatto**
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



Prof. Dr. **Marcelo Gonçalves Hönnicke**
Universidade Federal da Integração Latino-Americana - UNILA

RESUMO

Apesar das precauções tomadas durante a fase de projeto, os Veículos Subaquáticos Autônomos (VSA), objeto de estudo deste trabalho, podem sofrer faltas e falhas (perda total e parcial, respectivamente) de seus propulsores durante a missão. Isso acarreta em prejuízos, que vão desde o excessivo custo de manutenção à perda do veículo. Para lidar com esse tipo de problema, propôs-se o desenvolvimento de um Controle Tolerante a Faltas (CTF) utilizando a lógica *fuzzy* de Takagi-Sugeno para compensar as faltas e falhas dos propulsores em outros propulsores que estejam sadios e no mesmo plano de ação. Visando validar a estratégia de controle desenvolvida, aplicou-se a mesma em dois Veículos Subaquáticos Autônomos: o Biointeractive-1 e o Nerov. Ambos os veículos possuem 6 propulsores, sendo 4 horizontais e 2 verticais. Foram realizadas simulações numéricas no software *Matlab*® junto ao pacote *Simulink*®, nas quais os veículos percorreram 20 metros no eixo *x*, levando-se em consideração a ocorrência de falta e falha em dois propulsores horizontais em planos de ação diferentes. Os resultados obtidos mostraram que a compensação das forças dos propulsores faltantes nos propulsores que se encontram no mesmo plano de ação, por meio da mimetização aplicando a lógica *fuzzy* de Takagi-Sugeno, garante um erro de seguimento de trajetória aceitável e evita a oscilação brusca de forças nos propulsores sadios.

Palavras-chave: Veículos subaquáticos autônomos, Lógica *fuzzy*, Controle tolerante a faltas.

ABSTRACT

Despite the precautions taken during the design phase, the Autonomous Underwater Vehicles (AUV), object of study of this work, may suffer faults of its thrusters during the mission. This leads to losses, ranging from the excessive cost of maintenance to the loss of the vehicle. In order to deal with this type of problem, it is proposed the development of a Fault Tolerant Control (FTC) using Takagi-Sugeno fuzzy logic to compensate for the faults and failures of the thrusters in others that are healthy and in the same plane of action. Aiming to validate the developed control strategy, it has been applied in two AUV: Biointeractive-1(BA-1) and Nerov. Both vehicles have 6 thrusters, 4 horizontal and 2 vertical. Numerical simulations were carried out by using Matlab ® software into the Simulink ® package. For the vehicles traveled 20 meters on the x axis, taking into account the occurrence of fault and failure in the horizontal propeller 1 and fault in the propeller 4. The obtained results show that the compensation of the missing thrusters' forces in the thrusters that are in the same plane of action guarantees the proper trajectory of the vehicles with accuracy and prevents abrupt oscillation of forces in the healthy thrusters.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicles, fuzzy logic, Fault tolerant control

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter chegado até aqui.

Agradeço aos meus pais, irmã e namorada por todo o carinho e apoio durante a execução deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Carlos Henrique Farias dos Santos, que me auxiliou e orientou pacientemente desde a minha graduação em Engenharia Mecânica na Unioeste.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação pelo ensino.

Agradeço ao Parque Tecnológico de Itaipu pelo auxílio prestado durante a execução deste e de trabalhos prévios.

*“If you want to find the secrets of the universe, think in terms of energy,
frequency and vibration.”*

Nikola Tesla

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Lista de Símbolos	xxi
Lista de Abreviaturas	xxiii
1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa em utilizar o controle <i>fuzzy</i> Takagi-Sugeno	2
1.3 Artigos e obras relevantes sobre Veículos Subaquáticos Autônomos	2
1.4 Objetivo geral	3
1.5 Objetivos específicos	3
1.6 Materiais e métodos	4
1.7 Estrutura do trabalho	4
1.8 Resumo do capítulo	5
2. Modelos de veículos subaquáticos	7
2.1 Introdução	7
2.2 Veículos Subaquáticos Remotamente Operados (VSRO)	7
2.3 Veículos Subaquáticos Autônomos (VSA)	8
2.4 Veículos Subaquáticos Semiautônomos (VSSA)	9
2.5 Veículos Subaquáticos Com Sistemas Manipuladores (VSSM)	10
2.6 Biointeractive-1 (BA-1)	10
2.7 Projetos De Veículos Subaquáticos brasileiros	11
2.8 Veículo Subaquático Nerov	13
2.9 Resumo do capítulo	13
3. Modelagem da cinemática e dinâmica de veículos subaquáticos	15
3.1 Introdução	15
3.2 Modelagem cinemática	15
3.3 Modelagem dinâmica	18
3.4 Resumo do capítulo	24

4. Formulação matemática dos propulsores	25
4.1 Introdução.....	25
4.2 Configuração dos propulsores:	26
4.3 Definição do plano de ação.....	28
4.4 Resumo do capítulo.....	30
5. Linearização por realimentação de estados aplicada em veículos subaquáticos	31
5.1 Introdução.....	31
5.2 Formulação Matemática	31
5.3 Resumo do capítulo.....	33
6. Controle tolerante a faltas.....	35
6.1 Introdução.....	35
6.2 Conceitos de faltas e falhas	35
6.3 Conceitos de controle tolerante a faltas	36
6.4 Classificação de métodos de diagnóstico de faltas	37
6.5 Lógica <i>fuzzy</i> no Diagnóstico de Faltas.....	41
6.6 Resumo do capítulo.....	42
7. Conceitos da lógica e dos controladores <i>fuzzy</i>.....	43
7.1 Introdução.....	43
7.2 Lógica <i>fuzzy</i>	43
7.3 Função de pertinência	45
7.4 Operações em conjuntos <i>fuzzy</i>	50
7.5 Componentes de um controlador <i>fuzzy</i>	53
7.6 Controladores baseados em regras	60
7.7 Resumo do capítulo.....	62
8. Fundamentos dos Veículos Subaquáticos Autônomos estudados	63
8.1 Veículo Subaquático Biointeractive-1.....	63
8.2 Veículo Subaquático Nerov.....	69
8.3 Resumo do capítulo.....	72

9. Projeto do controlador <i>fuzzy</i> takagi-sugeno aplicado no controle tolerante a faltas de propulsores	73
9.1 Introdução	73
9.2 Propulsores virtuais	73
9.3 Método de alocação	74
9.4 Falta em dois propulsores em diferentes planos de ação	77
9.5 Resumo do capítulo	84
10. Resultados e discussões	85
4 10.1 Simulações para a condição falha de 50% no propulsor 1 e falta no propulsor 4	89
10.2 Simulações para as condições falta em T1 e T4	93
11. Conclusões	99
11.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	100
Referências bibliográficas	101
A. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR DESENVOLVIDO NO SOFTWARE MATLAB® JUNTO AO PACOTE SIMULINK®.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Veículo Subaquático Remotamente Operado (VSRO).....	8
Figura 2.2: Veículo Subaquático Autônomo.....	9
Figura 2.3: Veículo Subaquático Semiautônomo.....	9
Figura 2.4: Veículo Subaquático com Sistema manipuladores.....	10
Figura 2.5: Veículo Biointeractive-1.....	11
Figura 2.6: VSA Pirajuba.....	11
Figura 2.7: ROV – FURG.....	12
Figura 2.8: Veículo Subaquático Autônomo Flatfish.....	12
Figura 2.9: Veículo Subaquático Nerov.....	13
Figura 3.1: Referenciais inercial e móvel de um VS.....	15
Figura 4.1: Configuração dos propulsores do BA-1.....	28
Figura 4.2: Configuração dos propulsores no veículo: (a) Configuração em cruz e (b) Configuração em formato de X.....	29
Figura 4.3: Configuração dos planos de ação: vermelho – plano de ação 1; amarelo – plano de ação 2.....	30
Figura 5.1: Estrutura da lei de controle por realimentação de estados.....	33
Figura 6.1: Estrutura geral de um Controlador Tolerante a Falhas Ativo.....	36
Figura 6.2: Estrutura geral de um Controlador Tolerante a Falhas Passivo.....	37
Figura 6.3: Classificação dos métodos de diagnóstico de falta.....	37
Figura 6.4: Diagnóstico de Falta Baseado em Modelos (Redundância Analítica).....	38
Figura 6.5: Diagnóstico de Falta Baseado em Modelos (Redundância de Hardware).....	39
Figura 6.6: Classificação de diferentes conceitos de geração residual.....	40
Figura 6.7: Classificação de diferentes conceitos de avaliação residual.....	40
Figura 6.8: Estrutura geral de um filtro <i>fuzzy</i> para diagnóstico de faltas.....	42
Figura 7.1: Definição de um conjunto de pessoas altas partindo de um conjunto <i>crisp</i>	44
Figura 7.2: Definição de um conjunto de pessoas altas partindo de um conjunto <i>fuzzy</i>	45
Figura 7.3: Exemplo de uma função de pertinência linear crescente.....	46
Figura 7.4: Exemplo de uma função de pertinência triangular.....	47
Figura 7.5: Exemplo de uma função de pertinência trapezoidal.....	47
Figura 7.6: Exemplo de uma função de pertinência curva Z.....	48
Figura 7.7: Exemplo de uma função de pertinência Sigmoide crescente.....	49
Figura 7.8: Exemplo de uma função de pertinência Sigmoide decrescente.....	49
Figura 7.9: Exemplo de uma função de pertinência Sino-Gaussiana.....	50
Figura 7.10: Igualdade de conjuntos <i>fuzzy</i>	51
Figura 7.11: Relação de subconjuntos em conjuntos <i>fuzzy</i>	51
Figura 7.12: União de conjuntos <i>fuzzy</i>	52
Figura 7.13: Intersecção de conjuntos <i>fuzzy</i>	52
Figura 7.14: Complemento de conjuntos <i>fuzzy</i>	53
Figura 7.15: Diagrama de blocos de um controlador <i>fuzzy</i>	54
Figura 7.16 Exemplo de aplicação do toolbox <i>fuzzy</i> do Matlab.....	55
Figura 7.17: Função de pertinência para o erro da velocidade de rotação.....	56
Figura 7.18: Função de pertinência para o erro da aceleração de rotação.....	56

Figura 8.1: Veículo Subaquático autônomo Biointeractive-1.	63
Figura 8.2: Descrição geral do BA-1	64
Figura 8.3: Conceito do sistema de aquicultura	64
Figura 8.4: Subsistemas da configuração dos propulsores do BA-1.	65
Figura 8.5: Funcionalidades do BA-1	67
Figura 8.6: Placa controladora KOLABORD.	68
Figura 9.1: Princípio da reconfiguração do controlador para propulsores faltantes.	73
Figura 9.2: Seguimento de trajetória no plano horizontal usando deriva e guinada.....	76
Figura 9.3: Seguimento de trajetória no plano horizontal usando avanço e guinada. ...	77
Figura 9.4: Modelo matemático para o VSA	79
Figura 9.5: Funções de pertinência triangular para a variável Força(N). ..	81
Figura 9.6: Funções de pertinência triangular para a variável VelocidadeForça(N/s). ..	82
.....	82
Figura 9.7: Superfície de regras para funções de pertinência gaussianas.	82
Figura 10.1: Erros de trajetória aplicando a soma dos erros de propulsão.	86
Figura 10.2: Forças nos propulsores aplicando a soma dos erros de propulsão.	86
.....	86
Figura 10.3: Torque total do sistema aplicando a soma dos erros de propulsão.	87
Figura 10.4: Erros de trajetória aplicando o CTF com lógica <i>fuzzy</i>	88
Figura 10.5: Forças nos propulsores aplicando o CTF com lógica <i>fuzzy</i>	88
Figura 10.6: Torque total do sistema no sistema aplicando o CTF com lógica <i>fuzzy</i>	89
.....	89
Figura 10.7: Trajetória do veículo Nerov com falha em T1 e falta em T4.	90
Figura 10.8: Forças nos propulsores do veículo Nerov com falha em T1 e falta em T4. ...	90
.....	90
Figura 10.9: Erros da trajetória do veículo Nerov com falha em T1 e falta em T4.	91
Figura 10.10 Trajetória do veículo BA-1 com falha em T1 e falta em T4.	92
Figura 10.11: Forças nos propulsores do veículo BA-1 com falha em T1 e falta em T4.	92
.....	92
Figura 10.12: Erros da trajetória do veículo BA-1 com falha em T1 e falta em T4.	93
Figura 10.13: Trajetória do veículo Nerov quando T1 e T4 entram em falta.	94
Figura 10.14: Força nos propulsores do veículo Nerov quando T1 e T4 entram em falta.	95
.....	95
Figura 10.15: Erros do veículo Nerov quando T1 e T4 entram em falta.	95
Figura 10.16: Trajetória do veículo BA-1 quando T1 e T4 entram em falta.	96
Figura 10.17: Força nos propulsores do veículo BA-1 quando T1 e T4 entram em falta.	97
.....	97
Figura 10.18: Erros de trajetória do veículo BA-1 quando T1 e T4 entram em falta. ...	97
A.1: Estrutura geral do simulador.	105
A.2: Bloco gerador de torques.	106
Figura A.3: Sub-bloco Força nos propulsores.
.....	107
Figura A.4: Estrutura do bloco de saturação das forças nos propulsores.	108
.....	108
Figura A.5 Gerador de faltas nos propulsores 1 e 4.
.....	109

Figura A.6 Gerador de falha de 50% no propulsor 1 e falta no propulsor 4.
..... 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 7.1 Comparação das aplicações das funções de pertinência.....	50
Tabela 8.1 Relação de propulsores com movimentos do veículo.....	65
Tabela 8.2 Parâmetros utilizados nas simulações do BA-1.....	68
Tabela 8.3 Parâmetros utilizados nas simulações do Nerov.....	71
Tabela 9.1: Formato tabular do conjunto de regras. Fonte: O autor.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

$X Y Z$	Referencial móvel
$X_0 Y_0 Z_0$	Referencial inercial
u	Velocidade de avanço
v	Velocidade de deriva
w	Velocidade de oscilação
p	Velocidade de balanço
q	Velocidade de arfagem
r	Velocidade de guinada
v_1	Vetor de velocidades lineares no corpo móvel
v_2	Vetor de velocidades angulares no corpo móvel
v	Vetor de velocidades lineares e angulares no corpo móvel
η_1	Vetor de velocidades lineares no referencial inercial
η_2	Vetor de velocidades angulares no referencial inercial
η	Vetor de velocidades lineares e angulares no referencial inercial
x	Posição em relação ao eixo X
y	Posição em relação ao eixo Y
z	Posição em relação ao eixo Z
ϕ	Ângulo formado entre o eixo X e X_0
θ	Ângulo formado entre o eixo Y e Y_0
ψ	Ângulo formado entre o eixo Z e Z_0
$C_{x,\phi}$	Matriz de rotação no eixo X
$C_{y,\theta}$	Matriz de rotação no eixo Y
$C_{z,\psi}$	Matriz de rotação no eixo Z
$J_1(\eta_1)$	Matriz de transformação de velocidades lineares
$J_1(\eta_2)$	Matriz de transformação de velocidades angulares
$J_1(\eta)$	Matriz de transformação de velocidades lineares e angulares
I_0	Tensor de inércia
X	Força aplicada no eixo X
Y	Força aplicada no eixo Y
Z	Força aplicada no eixo Z
K	Momento aplicado no eixo X
M	Momento aplicado no eixo Y
N	Momento aplicado no eixo Z
M_{RB}	Matriz de inércia de um corpo rígido
C_{RB}	Matriz de Coriolis e Centrípeta de um corpo rígido
τ_{RB}	Forças e momentos aplicados em um corpo rígido
$C(v, \eta)$	Matriz de Coriolis e Centrípeta
M_A	Matriz de massa adicionada
$C_A(v)$	Matriz de Coriolis e Centrípeta de massa adicionada
$D_P(v)$	Amortecimento potencial
$D_S(v)$	Atrito de superfície
$D_W(v)$	Movimento de ondas
$D_M(v)$	Vórtices
$g(\eta)$	Vetor de forças restauradoras

r_G	Centro de gravidade
r_B	Centro de empuxo
W	Força peso
B	Força de empuxo
∇	Volume
$c(:)$	Cosseno
$s(:)$	Seno
$tg(:)$	Tangente
Q	Torque físico
T	Força de propulsão
ρ	Densidade
v_w	Velocidade d'água
σ	Ângulo de avanço do propulsor
n	Revoluções por segundo
C_T e L_a	Parâmetros do ângulo de avanço do propulsor
$T_{n n }$	Coefficiente de empuxo do propulsor
$Q_{n n }$	Coefficiente de torque do propulsor
L_a	Indutância na armadura do motor
R_a	Resistência na armadura do motor
i_a	Corrente na armadura do motor
V_a	Tensão de entrada no motor
J_p	Momento de inércia do motor
K_m	Constante eletromagnética do motor
$S(\lambda)$	Matriz simetricamente distorcida

LISTA DE ABREVIATURAS

BA-1	Biointeractive-1
GDL	Graus de liberdade
PID	Proporcional Integrativo Derivativo
GPS	<i>Global Position System</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
DVL	<i>Doppler Velocity Logs</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology (MIT)</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SNAME	<i>Society of Naval Architects and Marine Engineers</i>
VS	Veículos Subaquáticos
VSA	Veículos Subaquáticos Autônomos
VSRO	Veículos Subaquáticos Remotamente Operados
VSSA	Veículos Subaquáticos Semi-autônomos
VSSM	Veículos Subaquáticos com Sistemas Manipuladores
CTF	Controle Tolerante a Falhas
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i>
GDL	Graus De Liberdade

Capítulo 1

1. Introdução

Apesar dos avanços em pesquisas espaciais feitos pelo homem, como por exemplo o recente mapeamento de Júpiter (NASA, 2017), ainda não existe um conhecimento, ou mesmo um mapeamento, completo dos mares e oceanos da Terra. De acordo com Tavares (2003, apud Martins, 2000), os principais fatores responsáveis por isso são:

- Condições ambientais adversas;
- Fortes correntes;
- Elevadas pressões;
- Amplitude de áreas a serem exploradas;
- Custos de exploração.

Com o progresso da robótica e dos estudos de leis de controle, o uso de Veículos Subaquáticos (VS) aumentou nos campos de inspeções, monitoramento e estudo de ambientes submersos. Conforme Carvalho (2015), a vantagem de utilizar VS ao invés de mergulhadores está em não expor vidas humanas a riscos. Além disso, o tempo de permanência dos VS em ambientes sem oxigênio é superior ao de humanos.

Fossen (2012) classifica os VS em Veículos Subaquáticos Remotamente Operados (VSRO) e os Veículos Subaquáticos Autônomos (VSA). De acordo com Santos (2013), os veículos do primeiro grupo precisam receber os comandos do operador para a tomada de decisão, já os do segundo grupo, possuem a capacidade de tomada de decisão de forma autônoma.

Apesar das precauções tomadas durante a fase de projeto, os VSA, objeto de estudo deste trabalho, podem sofrer faltas dos seus propulsores durante a missão (Choi & Kondo, 2010). Além dos custos da manutenção do veículo, tem-se a possibilidade de perder o mesmo devido à falta parcial ou à falha completa de um ou mais propulsores. Cardozo (2013), cita que uma falta consiste na perda parcial de um componente, enquanto uma falha consiste na perda total do mesmo.

Visando lidar com situações de faltas e falhas, pode-se aliar à lógica de controle desses veículos o Controle Tolerante à Faltas (CTF), o qual lida com as faltas e as falhas dos componentes de um determinado sistema buscando manter o funcionamento adequado e garantir a estabilidade (Omerdic, 2004).

1.1 Motivação

Os VS têm uma vasta aplicação em diferentes meios submersos, tais como: inspeção de usinas hidrelétricas, monitoramento de bases petrolíferas, pesquisas no meio oceânico e cultivo de peixes. Ao utilizar esses veículos para realizar missões de inspeção e monitoramento, em ambientes hostis ou de grande periculosidade, evita-se a exposição de vidas humanas a riscos, tal como ocorreu em 2015 com o mergulhador Luke Seabrook que

faleceu durante a inspeção de uma unidade geradora da Usina de Força Anapolis Tidal na província de Nova Escócia, Canadá (CBC, 2015).

Conforme Omerdic (2009), o propulsor é o componente mais propenso a sofrer faltas e falhas dentre os subsistemas de um VS, além de ter influência direta no controle da trajetória do veículo. Caso a falta ou falha ocorra durante o funcionamento do veículo, pode-se não só comprometer a missão, como também, ocasionar na perda do VS. Portanto, é vital desenvolver uma lógica de controle que garanta que o veículo opere em níveis aceitáveis de erros de trajetória e que possa retornar à superfície em segurança.

Segundo Choi e Kondo (2010), ao desenvolver-se uma lei de Controle Tolerante a Faltas (CTF), pode-se aumentar a taxa de sucesso de uma missão do veículo, economizar recursos financeiros na manutenção, evitar danos irreversíveis, além de diminuir o erro da trajetória. Neste trabalho, desenvolveu-se uma lógica de CTF para VSA aplicando a lógica de controle *fuzzy* Takagi-Sugeno.

O motivo de testar o CTF desenvolvido nos veículos Biointeractive-1 e Nerov foi avaliar e comparar o desempenho do mesmo em veículos com parâmetros físicos e disposição de propulsores diferentes, os quais serão mostrados no Capítulo 8.

1.2 Justificativa em utilizar o controle *fuzzy* Takagi-Sugeno

Diferentemente da lógica binária, do tipo VERDADEIRO ou FALSO, a lógica *fuzzy* utiliza valores intermediários entre esses, portanto, consegue aplicar conceitos vagos tais como: meio quente, meio frio e muito alto. Essa lógica é válida para sistemas de controle, pois ocorre uma aproximação com o pensamento humano e, desta forma, auxilia no desenvolvimento desses.

Um controlador *fuzzy* aplica um conjunto de regras do tipo SE-ENTÃO que descrevem a ação que será tomada em uma determinada situação, sendo assim, podem-se combinar múltiplas entradas usando operadores lógicos tais como: E e OU (Jantzen, 2007). Isso é prático para sistemas dinâmicos com múltiplas entradas e múltiplas saídas, tais como VSA.

Mozelli (2008), cita que modelos *fuzzy* Takagi-Sugeno (1983) são sistemas de inferência capazes de descrever sistemas dinâmicos não-lineares por meio de um conjunto de sistemas dinâmicos lineares, localmente válidos, interpolados de forma suave. Logo, ao utilizar este tipo de controle tem-se uma redução do número de regras SE-ENTÃO em comparação a outras lógicas *fuzzy*, tal como a de Mandani (1974)

Desenvolvendo uma lei de controle tolerante a faltas, será possível garantir o controle de trajetória do VSA apesar dos distúrbios e faltas dos propulsores, o que na prática leva a garantir o sucesso da missão do VSA e a evitar possíveis perdas, tais como a do próprio veículo.

1.3 Artigos e obras relevantes sobre Veículos Subaquáticos Autônomos

Nesta subseção, faz-se uma breve introdução de algumas bibliografias pertinentes utilizadas neste trabalho

1.3.1 Biointeractive Autonomous Underwater Vehicle “BA-1” - Kondo *et al.* (2010)

No artigo publicado por Kondo *et al.* (2010) é descrito o funcionamento do VSA Bionteractive-1 (BA-1). A finalidade de sua construção e a distribuição dos propulsores do veículo. O BA-1 possui 6 propulsores, sendo dois verticais e quatro horizontais.

1.3.2 On Fault-Tolerant Control of a Hovering AUV with Four Horizontal and Two Vertical Thrusters - Choi e Kondo (2010)

Neste artigo, os autores mostram um CTF para o BA-1 lidando com três diferentes condições de falta dos propulsores. O cerne do trabalho está na reconfiguração da matriz de configuração dos propulsores, que é feita para cada condição de falta do veículo

1.3.3 Thruster Fault-Tolerant Control: Thruster Fault Diagnosis and Accommodation System for Underwater Vehicles – Omerdic, E. (2009)

Omerdic demonstra em sua obra métodos para diagnosticar as faltas dos propulsores e realizar o CTF. O mesmo pode ser passivo, quando o CTF é feito durante a etapa de projeto do veículo ou ativo, quando o CTF é feito por meio sistemas de Detecção e Diagnósticos de Faltas (DDF).

1.3.4 Um estudo sobre a modelagem e o controle de veículos subaquáticos não tripulados – Tavares, A. M. (2003)

Na dissertação de Tavares, é feito um estudo sobre três modelos de veículos subaquáticos: O Nerov, o Tatuí e o Remus. Além disso, mostra-se uma comparação de resultados utilizando um controle em malha aberta com um controle por realimentação linearizante.

1.4 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma lógica de CTF utilizando uma lógica *fuzzy* Takagi-Sugeno visando a compensação das faltas dos propulsores, aliado ao controle da trajetória. Desta forma, garante-se um menor impacto da falta ao sistema de propulsão ao evitar grandes oscilações no torque total gerado pelos propulsores. Além disso, tem-se uma economia de energia em relação à soma dos erros de propulsão no mesmo plano de ação.

1.5 Objetivos específicos

- Modelar matematicamente e programar a cinemática e a dinâmica dos veículos BA-1 e Nerov;
- Programar a lógica de controle por realimentação linearizante para os dois veículos;
- Programar a lógica de CTF utilizando o controle *fuzzy* de Takagi-Sugeno nos softwares Matlab ® e Simulink®;
- Realizar simulações numéricas dos dois veículos para as mesmas trajetórias e mesmas condições de falta;

1.6 Materiais e métodos

Para validar o CTF desenvolvido, modelou-se matematicamente os veículos BA-1 e o Nerov, levando-se em consideração fatores como: massa, altura, inércia, distribuição dos propulsores, coeficientes hidrodinâmicos etc. Em seguida, programou-se no *software* Matlab® e no pacote Simulink® o modelo matemático. A partir de trajetórias preestabelecidas avaliou-se os resultados do CTF proposto diante dos casos de condições de falta de dois propulsores horizontais e um vertical.

1.7 Estrutura do trabalho

1.7.1 Capítulo 1: Introdução

Neste capítulo, exibiram-se os motivos que levaram este trabalho a ser feito, assim como o objetivo geral e os objetivos específicos. Além disso, mostrou-se a metodologia e meios utilizados para obter os resultados esperados e, ao final, mostrou-se a estrutura do trabalho.

1.7.2 Capítulo 2: Modelos de Veículos Subaquáticos

No Capítulo 2 serão mostrados os diferentes modelos de veículos subaquáticos já desenvolvidos, explicando a diferença entre veículos subaquáticos remotamente operados (VSRO) e veículos subaquáticos autônomos (VSA).

1.7.3 Capítulo 3: Modelagem da Cinemática e da Dinâmica de Veículos subaquáticos

No Capítulo 3 explica-se a formulação matemática utilizada para simular os veículos subaquáticos, os quais possuem uma dinâmica descrita em seis graus de liberdade e dois referenciais (um fixo e um móvel dentro do VSA).

1.7.4 Capítulo 4: Formulação matemática dos propulsores

No Capítulo 4 faz-se uma descrição do modelamento matemático dos propulsores relacionando a força dos propulsores com as forças e momentos do veículo.

1.7.5 Capítulo 5: Controlador via realimentação linearizante

No Capítulo 5, mostra-se a lei de controle utilizada para controlar a trajetória dos VSA. A lei de controle por realimentação linearizante utiliza os parâmetros de controle proporcional, integrativo e derivativo: K_p , K_d e K_i . Esses levam em consideração o erro, a velocidade do erro e a aceleração do erro.

1.7.6 Capítulo 6: Controle Tolerante a faltas:

No Capítulo 6 serão descritos os conceitos do controlador tolerante a faltas. Para tal, mostra-se uma revisão dos conceitos na bibliografia de Omerdic (2006).

1.7.7 Capítulo 7: Conceitos da lógica *fuzzy*:

No Capítulo 7 foram introduzidos os conceitos da lógica *fuzzy* aplicada no controlador. Primeiramente fez uma revisão dos conceitos dos conjuntos Zadeh (1973), passando-se em

seguida para as definições de função de pertinência e operadores *fuzzy* e concluindo com os trabalhos de Mandani (1974) e Takagi-Sugeno (1983).

1.7.8 Capítulo 8: Fundamentos do controlador

No Capítulo 8 explicou-se sobre os dois veículos subaquáticos utilizados neste trabalho (Nerov e Biointeractive-1), bem como as suas funcionalidades, aplicações e os parâmetros utilizados no simulador.

1.7.9 Capítulo 9: Projeto do Controlador *fuzzy* Takagi-Sugeno aplicado em VSA:

No Capítulo 9 foi exibido o projeto do controlador seguindo o modelo proposto por Santos (2016). Para o desenvolvimento do controlador buscou-se, nos casos de faltas e falhas, a compensação nos propulsores sádios.

1.7.10 Capítulo 10: Resultados e discussões

No Capítulo 10 mostraram-se os resultados para os dois veículos subaquáticos. Tanto o veículo Nerov quanto o BA-1 foram submetidos às condições de faltas e falhas em dois propulsores horizontais em planos de ação diferentes.

1.7.11 Capítulo 11: Conclusões

No capítulo 11 são mostradas as conclusões do CTF desenvolvido e sugestões para trabalhos futuros.

1.8 Resumo do capítulo

Abordou-se neste capítulo a estrutura deste trabalho, citando-se os motivos, objetivos, materiais e métodos e a disposição dos capítulos. As principais referências bibliográficas são abordadas, levando-se em consideração os trabalhos de Fossen (1994), Choi e Kondo (2010), Omerdic (2010), Santos (2016) e Tavares (2003).

Capítulo 2

2. Modelos de veículos subaquáticos

2.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é mostrar os diferentes tipos de VS que são utilizados em pesquisas oceânicas, monitoramento, inspeção e entre outros. Em seguida, serão exibidos os projetos dos dois veículos estudados nesta dissertação e projetos brasileiros de VSRO e VSA.

De acordo com a revista Chen (2015) estima-se que menos de 5% de todo oceano seja conhecido. Isso se deve a dificuldade em mapear o espaço interno dos oceanos, pois, diferentemente da superfície, não se pode visualizar o piso oceânico utilizando satélites devido à profundidade do mesmo. Neste caso, é necessário fazer uma inspeção mais próxima, utilizando sistemas de filmagem e monitoramento, em que o uso de VS não tripulados é uma solução viável para esta necessidade.

Conforme Omerdic (2004), os veículos subaquáticos podem ser definidos da seguinte maneira:

- **Submarinos:** Qualquer embarcação naval capaz de se propulsionar abaixo d'água, assim como na superfície da mesma. Esta é uma capacidade única entre os navios de guerra, além disso, veículos submarinos são levemente diferentes de navios, em projeto e aparência.
- **Veículos Subaquáticos:** Pequeno veículo capaz de propulsionar embaixo da superfície d'água assim como na superfície da mesma. Isso inclui os VSRO, VSA, além de outros modelos, que usados tanto pela marinha quanto para fins comerciais.

Com o avanço da robótica e da mecatrônica houve um aumento no uso de robôs para inspeção EM ambientes subaquáticos, os quais podem também ser usados para inspeção de barragens. Vários segmentos de veículo subaquáticos serão descritos nas seções 2.2 à 2.6.

2.2 Veículos Subaquáticos Remotamente Operados (VSRO)

Estes veículos podem realizar missões de inspeção e monitoramento, porém não possuem capacidade de tomada de decisão. Sendo assim, devem ter um operador controlando a trajetória através dos sinais enviados por meio de uma série de cabos ligados ao VSRO. Na figura 2.1 é mostrado um exemplo de um VSRO.



Figura 2.1: Veículo Subaquático Remotamente Operado (VSRO).
Fonte: <<https://diariodopresal.wordpress.com/tag/veiculo-submarino-operado-remotamente-vsor/>>.

2.3 Veículos Subaquáticos Autônomos (VSA)

Os veículos subaquáticos autônomos possuem capacidade de tomada de decisão durante a missão. Devido a sua intensa capacidade de processamento são mais caros e mais eficazes em relação a outros tipos de VS. A fonte de energia permanece no próprio VSA, em forma de baterias. Essa é a principal limitação desse tipo de veículo. Pode-se observar na figura 2.2 um VSA atuando em uma missão. Esse VSA é denominado Remus e possui a capacidade de alcançar até 6000 metros abaixo do nível do mar. Além disso, conta com uma extensa quantidade de sensores embarcados que garantem a realização de missões de pesquisas hidrográficas, operações de segurança de portos, amostragem e mapeamento científico.



Figura 2.2: Veículo Subaquático Autônomo.
Fonte: <<http://www.ibtimes.co.uk>>.

2.4 Veículos Subaquáticos Semiautônomos (VSSA)

Assim como no caso dos VSA, este tipo de veículo tem a capacidade de tomada de decisão de forma autônoma, entretanto pode-se efetuar intervenções humanas, mediante um sistema computacional remotamente, alterando a trajetória e o monitoramento (Choi, 2010). De acordo com (Rao, 20044), a diferença entre os VSA e os VSSA está na capacidade de troca de informações entre o veículo semiautônomo e o operador, tais como imagens e vídeos, por meio do uso de radiofrequência.

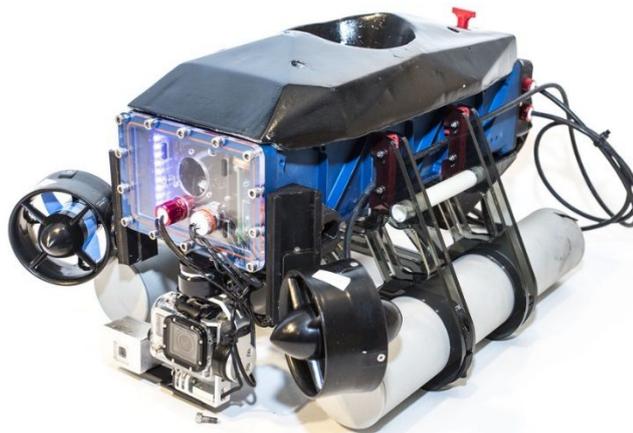


Figura 2.3: Veículo Subaquático Semiautônomo.
Fonte: <<http://fosterdcollins.weebly.com>>.

2.5 Veículos Subaquáticos Com Sistemas Manipuladores (VSSM)

Em missões que o veículo necessite realizar uma coleta ou uma interação com o meio ambiente, pode-se equipá-los com um ou mais manipuladores. Esse veículo subaquático pode ser tanto do tipo autônomo (VSA) quanto do tipo remotamente operado (VSRO).



Figura 2.4: Veículo Subaquático com Sistema manipuladores.
Fonte: <<https://www.oceanering.com/>>.

2.6 Biointeractive-1 (BA-1)

O VSA Biointeractive-1 proposto por Kondo *et al.* (2010) possui 6 propulsores, dos quais quatro são horizontais e dois são verticais. O mesmo é utilizado no cultivo de peixes. O projeto foi desenvolvido pela Universidade de Ciência Marinha e Tecnologia de Tokyo ("Tokyo University of Marine Science and Technology" -TUMSAT). O primeiro modelo do BA-1 foi lançado em 2009, possuindo diversos sistemas eletrônicos para navegação, podendo citar:

- Sistema de Posicionamento Global ou Global Positioning System (GPS);
- Sistema de Navegação Inercial ou Inertial Navigation System (INS);
- Registros de velocidade Doppler ou Doppler Velocity Logs (DVL);
- Sistema de iluminação;
- Sistema de monitoramento via filmagem.

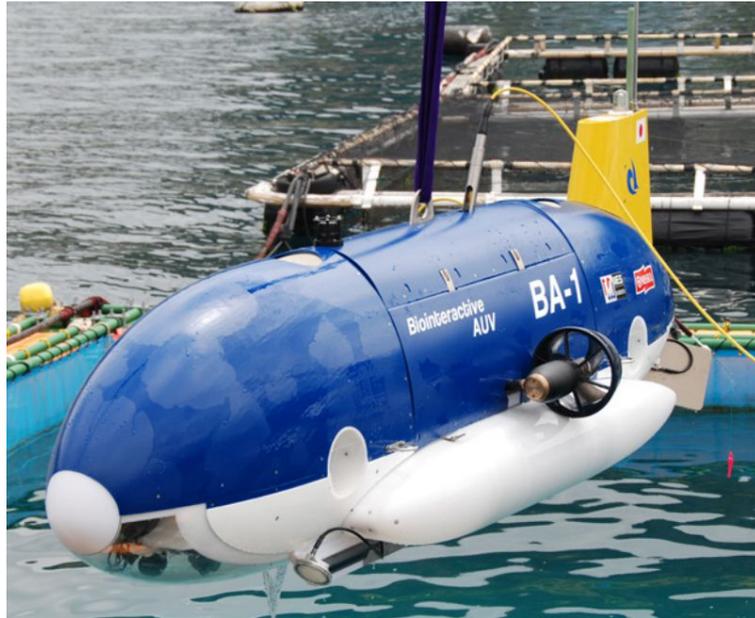


Figura 2.5: Veículo Biointerativo-1.
Fonte: Kondo *et al.*, 2010.

2.7 Projetos De Veículos Subaquáticos brasileiros

Em junho de 2012 o Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos (PMR) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP) desenvolveu seu primeiro VSA, nomeado Pirajuba, que na língua Tupi significa “peixe amarelo”. O objetivo é que o veículo possa, no futuro, facilitar o mapeamento do solo marinho, além de ser usado em trabalhos de inspeção de instalações submersas, como por exemplo oleodutos e gasodutos.

O Pirajuba, visto na figura 2.6, pode atingir aproximadamente 10 quilômetros por hora (km/h), mede 1,78 metros de comprimento e tem 23 de centímetros de diâmetro. Além disso, o custo de produção demandou um investimento de aproximadamente R\$ 200.000,00.



Figura 2.6: VSA Pirajuba.
Fonte: <http://revistapesquisa.fapesp.br>.

O projeto ROV-FURG, exibido na figura 2.7, foi desenvolvido com a finalidade de produzir um VSRO com tecnologia nacional e de baixo custo. Conforme Centeno (2007), o sistema conta com uma eletrônica embarcada que garante o monitoramento por meio de: *zoom*, *foco*, nível de iluminação. O controle da trajetória é efetivado através de um único joystick.



Figura 2.7: ROV – FURG. Fonte: <http://www.numa.furg.br>.

De acordo com Reis(2015), o SENAI CIMATEC desenvolveu o FlatFish, vide figura 2.8, que é um VSA projetado com o objetivo de realizar inspeções visuais em 3D de alta resolução para alcançar níveis avançados na exploração de petróleo e gás em águas profundas. Conforme os autores, o protótipo é o primeiro desenvolvido no Brasil e, além de garantir maior segurança operacional e, também, ao meio ambiente, reduzirá drasticamente os custos atuais para operações deste tipo.

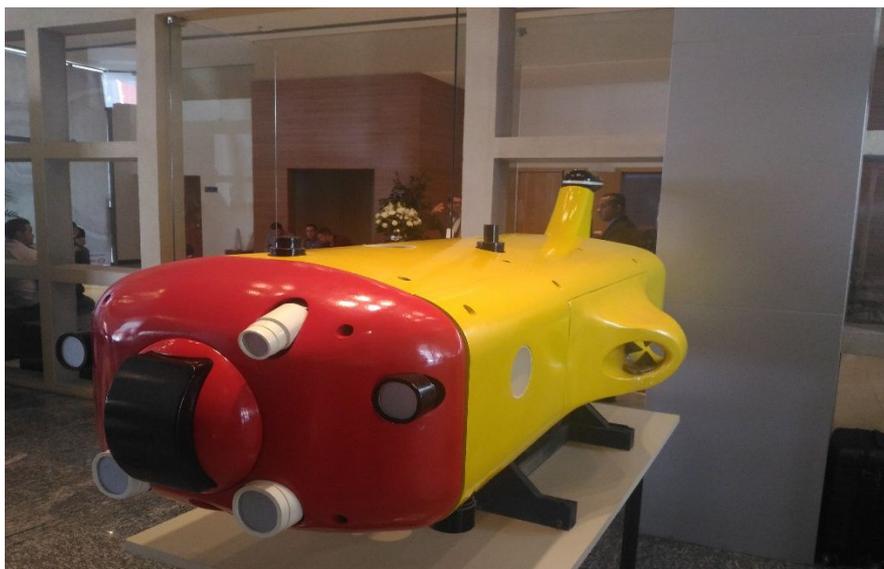


Figura 2.8: Veículo Subaquático Autônomo Flatfish. Fonte: O autor.

Da mesma forma que os veículos Bionteractive-1 e Nerov, o Flatfish conta com 6 propulsores. Além disso o primeiro protótipo pode operar em profundidades de até 300 metros, com autonomia de 35 a 60 quilômetros.

Em médio prazo, a equipe desenvolvedora espera que o FlatFish possa operar em profundidade de até 3 mil metros, para que contribua com uma exploração otimizada da camada de pré-sal. Até o presente trabalho, foram investidos cerca de R\$ 30 milhões no projeto. O DFKI (Instituto Alemão de Robótica e Inteligência Artificial) apoiou tecnicamente o desenvolvimento do VSA.

2.8 Veículo Subaquático Nerov

O Nerov é um veículo subaquático não tripulado do tipo autônomo (VSA) especialmente projetado para testes de controle de inteligência avançada e algoritmos de controle convencionais (Fossen e Balchen, 1991). Conforme é exibido na figura 2.9, o veículo possui 6 propulsores ajustáveis (T1 ao T6) que são capazes de controlar em pares os movimentos de rotação e translação. Mais detalhes do veículo Nerov serão discutidos no Capítulo 8.

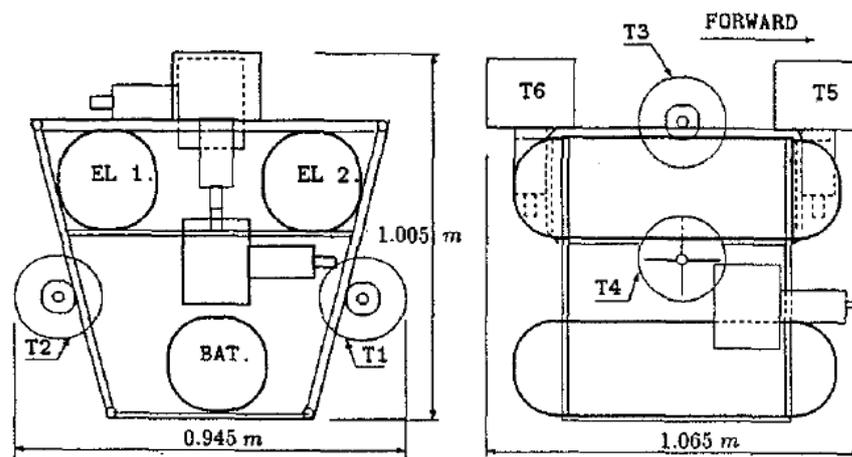


Figura 2.9: Veículo Subaquático Nerov. Fonte: Fossen e Balchen, 1991.

2.9 Resumo do capítulo

Neste capítulo fez-se uma revisão dos conceitos de veículos subaquáticos, além de apresentar os diversos modelos e projetos já desenvolvidos. Foram apresentados os dois veículos subaquáticos que estudados neste trabalho (Bionteractive-1 e Nerov). Um detalhamento mais especificado sobre os dois veículos estudados será feito no Capítulo 8, no qual são mostrados os parâmetros utilizados na modelagem matemática e a disposição dos propulsores.

Capítulo 3

3. Modelagem da cinemática e dinâmica de veículos subaquáticos

3.1 Introdução

Neste capítulo, explica-se a modelagem da cinemática e da dinâmica de VS. Primeiramente, mostram-se os dois referenciais usados no equacionamento. Em seguida, exibe-se a matriz de rotação, aplicada para relacionar os dois referenciais: o referencial móvel e o referencial inercial. Além disso, citam-se os três métodos para efetuar a modelagem cinemática: Ângulos de Euler, Parâmetros de Euler e Parâmetros de Rodrigues. Neste trabalho, optou-se por utilizar o primeiro, por causa da facilidade na visualização de veículo e exatidão razoável (Tavares, 2003).

3.2 Modelagem cinemática

Conforme Fossen (2012), é conveniente usar dois referenciais na análise cinemática de um VS com 6 graus de liberdade, sendo um referencial no centro do veículo, intitulado referencial do corpo ou referencial móvel (X_0, Y_0 e Z_0) e um referencial fixo na terra denominado referencial inercial (X, Y, Z). Logo, a dinâmica do veículo é totalmente modelada no referencial do corpo e em cada intervalo de integração numérica fazem-se transformações para o referencial inercial (Tavares, 2003).

Na figura 3.1 é mostrada a relação entre o referencial móvel e o referencial inercial de um VS, em que o ponto O se encontra no centro de gravidade do veículo e X_0, Y_0 e Z_0 coincidem com os eixos principais de inércia do mesmo.

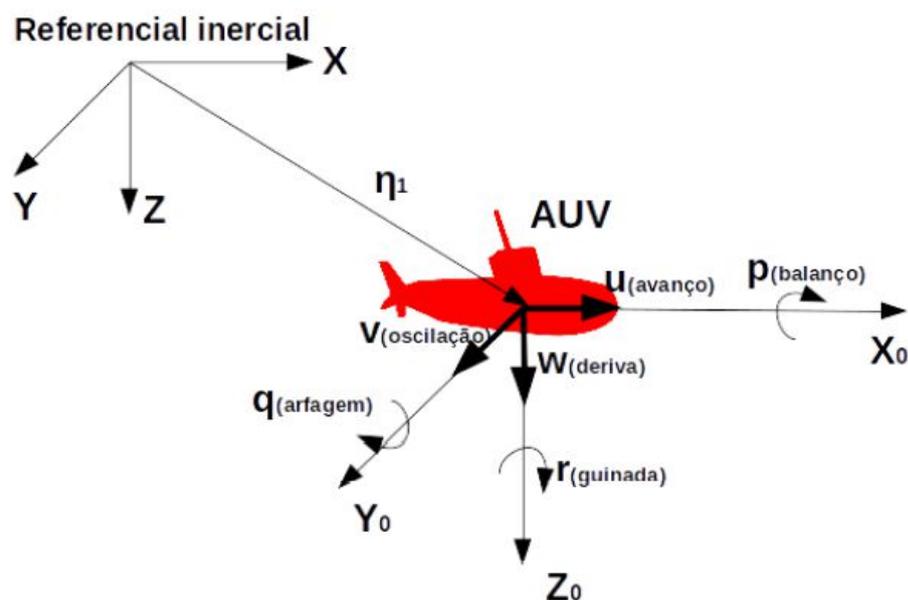


Figura 3.1: Referenciais inercial e móvel de um VS. Fonte: Fossen, 2012.

Conforme a Sociedade de Arquitetos Navais e Engenheiros Mecânicos (em inglês: *Society of Naval Architects and Marine Engineers* ou SNAME), pode-se descrever o movimento de um VS em:

- u (“*Surge*” ou Avanço): Definido como componente linear da velocidade que atua na direção X_0 ;
- v (“*Sway*” ou Deriva): Definido como componente linear da velocidade que atua na direção Y_0 ;
- w (“*Heave*” ou Oscilação): Definido como componente linear da velocidade que atua na direção Z_0 ;
- p (“*Roll*” ou Balanço): Definido como componente angular da velocidade que atua na direção X_0 ;
- q (“*Pitch*” ou Arfagem): Definido como componente angular da velocidade que atua na direção Y_0 ;
- r (“*Yaw*” ou Guinada): Definido como componente angular da velocidade que atua na direção Z_0 .

Os vetores de velocidade linear (v_1) e velocidade angular (v_2) são expressos por:

$$v_1 = [u, v, w]^T \quad (3.1)$$

$$v_2 = [p, q, r]^T \quad (3.2)$$

Logo, o vetor de velocidades no referencial móvel é dado por:

$$v = [v_1, v_2]^T \quad (3.3)$$

Para o referencial inercial, tem-se que os vetores de velocidade linear (η_1), velocidade angular (η_2) são representados por:

$$\eta_1 = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T \quad (3.4)$$

$$\eta_2 = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T \quad (3.5)$$

Ao adotar o referencial inercial como o ponto (0,0,0), é possível encontrar os vetores de posição e orientação do veículo, por meio da integração de η_1 e η_2 , conforme as equações:

$$\eta_1 = [x, y, z]^T \quad (3.6)$$

$$\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T \quad (3.7)$$

Onde, x , y e z são as posições do referencial do corpo em relação aos eixos ordenados e ϕ , θ e ψ representam a orientação do veículo em relação ao referencial inercial. Tavares (2003), cita que não se deve integrar diretamente as velocidades lineares e angulares no referencial do corpo, pois não há um sentido físico para isso.

Conforme Fossen (2012), a trajetória do veículo relativa ao sistema de coordenadas do referencial inercial é dada pela transformação da velocidade do corpo para a velocidade no referencial inercial. Para isso, usam-se três equações de transformação:

- Ângulos de Euler;
- Parâmetros de Euler;
- Parâmetros de Rodrigues.

3.2.1 Matriz de Rotação

A função da matriz de rotação é definir a orientação relativa do referencial móvel em relação ao referencial inercial, portanto, pode-se representar os dois sistemas no mesmo ponto (Tavares, 2003).

Teorema 3.1 (Teorema de Euler sobre Rotações). *Qualquer mudança na orientação relativa entre dois referenciais pode ser produzida por meio de uma simples rotação entre ambos.*

De acordo com Fossen (2012), se a for um vetor fixo em A e b for um vetor fixo em B, então, o vetor b pode ser expresso em termos do vetor a e de um vetor $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$ (paralelo ao eixo de rotação L), por meio de uma simples rotação. Sendo o ângulo de rotação do vetor b denominado como β , a rotação de a para b é definida como:

$$b = Ca \quad (3.8)$$

Portanto, a matriz de rotação pode ser descrita como

$$C = \cos \beta I + (1 - \cos \beta)\lambda\lambda^T - \sin \beta S(\lambda) \quad (3.9)$$

onde I representa a matriz identidade de terceira ordem, β equivale ao ângulo de rotação do referencial móvel em torno do vetor unitário $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$. A matriz $S(\lambda)$ é a matriz simetricamente distorcida, sendo calculada por meio do vetor unitário λ (Fossen, 1994).

3.2.2 Ângulos de Euler

O método dos ângulos de Euler é feito para alinhar os três referenciais por meio de sucessivas rotações nos três eixos coordenados, onde cada rotação em torno de um eixo é denominada rotação principal. Utilizando os valores de $\lambda_1 = [1; 0; 0]$, $\lambda_2 = [0; 1; 0]$ e $\lambda_3 = [0; 0; 1]$ e fazendo $c = \text{cosseno}$, $s = \text{seno}$ e $tg = \text{tangente}$, encontram-se as rotações principais do veículo em torno dos eixos x , y e z :

$$C_{x,\phi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{pmatrix}, C_{y,\theta} = \begin{pmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & -c\theta \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

$$C_{z,\psi} = \begin{pmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Com as rotações principais nos três eixos pode-se equacionar as transformações das velocidades lineares e angulares. No caso da velocidade linear, precisa-se multiplicar as matrizes de rotação nos três eixos (x , y e z). De acordo com Fossen (2002), é prático utilizar

a representação xyz para os ângulos de Euler, porém a ordem das rotações não é arbitrária. Realizando a multiplicação na ordem xyz obtém-se:

$$J_1(\eta) = C_{x,\phi}^T C_{y,\theta}^T C_{z,\psi}^T \quad (3.11)$$

Substituindo-se os valores de $C_{x,\phi}^T C_{y,\theta}^T C_{z,\psi}^T$ da equação 3.10 na equação 3.11:

$$J_1(\eta_1) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi c\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta c\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Para a transformação da velocidade angular referenciada no corpo $v_2 = [p, q, r]^T$ na velocidade angular no referencial inercial η_2 , segue-se:

$$\eta_2 = J_1(\eta_2)v_2 \quad (3.13)$$

Existe uma diferença entre a obtenção da matriz de transformação da velocidade linear para a angular, pois no segundo caso é possível realizar a integração direta. A demonstração matemática pode ser vista na obra de Fossen (2012). A matriz de transformação da velocidade linear ($J_1(\eta_2)$) e a matriz de transformação da velocidade angular $J_2(\eta_2)$ são definidas por Fossen (2012):

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & s\psi c\phi + c\psi c\phi s\theta \\ 0 & c\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{s\phi}{s\theta} \end{bmatrix}, J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\theta \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Para ambas as velocidades é possível encontrar a velocidade do corpo com as matrizes de transformação, sendo feito por meio da inversão de $J_1(\eta)$ e $J_2(\eta)$, conforme pode-se observar nas equações 3.15 e 3.16:

$$v_1 = J_1(\eta_1)^{-1}\eta_1 \quad (3.15)$$

$$v_2 = J_2(\eta_2)^{-1}\eta_2 \quad (3.16)$$

A simulação implementada neste trabalho, conforme será vista nas próximas seções, trabalha com transformações do referencial móvel para o referencial inercial a cada intervalo de tempo:

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_1) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = J(\eta) \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

3.3 Modelagem dinâmica

Nesta seção serão apresentadas as equações dinâmicas nos 6 graus de liberdade (GDL) dos VSA, bem como as considerações feitas e as formulações utilizadas nas deduções

matemáticas. A dinâmica é feita no referencial do corpo e é modelada por princípios da mecânica de Newton e de Lagrange.

O movimento de um VSA pode ser descrito por uma equação dinâmica de sexta ordem, conforme Fossen (2011) e Fossen (2012) é dada por:

$$M\dot{v}_r + C(v_r)v_r + D(v_r)v_r + g(\eta) = \tau \quad (3.18)$$

onde, $v_r = v - J(\eta)^{-1}v_c$ é a velocidade relativa entre os veículos e a correnteza do meio, $J(\eta)^{-1}$ é a matriz de transformação para expressar a transformação entre o referencial inercial e o referencial do corpo, $v_c = [u_c, v_c, w_c, 0, 0, 0]^T$ é um vetor de velocidades de correntezas não-rotacionais, expresso no referencial inercial. $M_{6 \times 6} = M_{RB} + M_A$ é a matriz de inércia do veículo (M_{RB}) somada a matriz de massa adicional hidrodinâmica (M_A), $C_{6 \times 6}(v_r) = C_{RB}(v_r) + C_A(v_r)$ é a matriz Coriolis e centrípeta do veículo ($C_{RB}(v_r)$) somado à matriz Coriolis e centrípeta da massa adicionada ($C_A(v_r)$), $D(v_r)$ é matriz de amortecimento, $g(\eta)$ é o vetor de momentos e forças gravitacionais e τ é o vetor de forças e momentos nos propulsores.

A formulação de Newton é baseada na "Segunda lei de Newton", conforme pode-se observar:

$$m\dot{v} = f_c \quad (3.19)$$

Em (3.19) m é a massa, v_c é a aceleração e f_c é a força atuando sobre o corpo. Vale salientar que a não aplicação de uma força sobre o corpo ($f_c = 0$) não necessariamente gera uma velocidade nula ($v_c = 0$), pois o mesmo pode estar em velocidade constante, caso não existam forças dissipativas. Neste caso, tem-se uma aproximação da "A Primeira lei de Newton"(Fossen, 2002).

3.3.1 Axiomas de Euler

Leonhard Euler (1707-1783) propôs em sua obra, intitulada "Novi Commentarii Academia Scientarium Petropolitane", uma nova interpretação da Segunda Lei de Newton, acoplando conservação do momento linear p_c e momento angular h_c . Estes termos são respectivamente conhecidos como o primeiro e segundo axioma de Euler (Fossen,1994), que podem ser vistos nas seguintes equações:

$$\dot{p}_c = f_c, p_c = mv_c \quad (3.20)$$

$$\dot{h}_c = m_c, h_c = I_c\omega \quad (3.21)$$

onde I_c é o tensor de inércia no centro de gravidade do corpo, ω é o vetor de velocidade angular, f_c e m_c são as forças e momentos aplicadas ao corpo em questão, também aplicadas no centro de gravidade do um corpo.

3.3.2 Dinâmica de Corpo Rígido

Utilizando-se o primeiro e segundo axiomas de Euler é possível encontrar as equações de movimento para um corpo rígido. Conforme Fossen (2012), supondo um sistema de coordenadas em um determinado referencial móvel $X_0Y_0Z_0$ com origem em O , ao rotacionar

o corpo com uma velocidade angular $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^T$ em função de outro sistema de coordenadas de referencial de corpo fixo. O tensor de inércia I_0 deste sistema móvel pode ser calculado como:

$$I_0 = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}, I_0 = I_0^T > 0 \quad (3.22)$$

Na diagonal principal, os valores I_x , I_y e I_z são respectivamente os momentos de inércia em relação aos eixos X_0 , Y_0 e Z_0 , ou seja, o grau de dificuldade em se alterar o estado de movimento deste corpo em rotação para cada um destes eixos. Já os valores $I_{yx} = I_{xy}$, $I_{yz} = I_{zy}$ e $I_{zx} = I_{xz}$ são os produtos de inércia do corpo. Conforme explicado na seção 2.1, o veículo possui caráter simétrico, logo os valores dos produtos de inércia serão nulos.

$$I_0 \triangleq \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}, I_0 = I_0^T > 0 \quad (3.23)$$

Conforme Fossen (2002), a representação vetorial de um corpo rígido com 6 GDL pode ser descrita através da equação 3.24:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \quad (3.24)$$

Na equação (3.24), M_{RB} é a matriz de inércia do corpo rígido, $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ é o vetor de velocidades no corpo fixo, $C_{RB}(v)$ é a matriz de Coriolis e Centrípeta e $\tau_{RB} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ é o vetor generalizado de forças (X, Y e Z) e momentos (K, M e N) aplicados ao corpo.

Além disso, Fossen (2002) cita que a parametrização de uma matriz de inércia de um corpo rígido satisfaz as seguintes relações:

$$M_{RB} = M_{RB}^T > 0, \dot{M}_{RB} = 0 \quad (3.25)$$

Considerando os parâmetros dos VSA BA-1 e Nerov, a matriz de inércia do corpo rígido pode ser descrita como:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_0 & -mS(rg) \\ -mS(rg) & I_0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

onde m é a massa do veículo e $S(rg)$ é a matriz simetricamente distorcida do centro de gravidade dos veículos

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & m_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -m_G & 0 \\ 0 & mz_G & -my_G & I_0 & 0 & 0 \\ -mz_G & 0 & m_G & 0 & I_0 & 0 \\ my_G & -m_G & 0 & 0 & 0 & I_0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Além do termo M_{RB} existe o termo de Coriolis para ser calculado que, conforme visto na equação 3.27, para isso será utilizado o seguinte teorema (Fossen, 2012):

Teorema 3.2 (Matriz de Coriolis e Centrípeta encontrados pela Matriz de Inercia): Seja $M > 0$ uma matriz de inércia 6x6 definida como:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Então pode-se sempre parametrizar a matriz de Coriolis e Centrípeta como $C(v) = C(v)^T$ definindo:

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) \\ -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) & -S(M_{12}v_1 + M_{22}v_2) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Aplicando a propriedade para matrizes de corpos rígidos proposta por Fossen (2002):

Propriedade 3.1 Parametrização da matriz de Coriolis e Centrípeta para cálculo de C_{RB} :

De acordo com o teorema 3.2, a matriz de Coriolis e Centrípeta para corpos rígidos $C_{RB}(v)$ pode sempre ser parametrizada a ponto de ser também simetricamente distorcida, tal que:

$$C_{RB}(v) = -C_{RB}(v)^T \quad (3.30)$$

A aplicação do teorema 3.2 com $M = M_{RB}$ gera a seguinte expressão para $C_{RB}(v)$:

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -mS(v_1) - mS(S(v_2)r_G) \\ -mS(v_1) - mS(S(v_2)r_G) & mS(S(v_1)r_G) - S(I_0v_2) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Três outras representações podem ser derivadas pela equação 3.31, (Fossen, 1994, pg. 28), em que, ao final, a expressão de $C_{RB}(v)$ é descrita da seguinte forma:

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G q + w) & -m(z_G q + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & -m(x_G p + y_G q) \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G q + w) & m(z_G p - v) & 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p + I_y q \\ m(x_G q - w) & -m(z_G q + x_G p) & m(z_G q + u) & I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r & 0 & I_{xz}r - I_{xy}q + I_z p \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) & -I_{yz}r - I_{xy}p - I_y q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_z p & 0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

3.3.3 Forças e Momentos hidrodinâmicos

Levando em conta estas forças em que atuam sobre um VS, tem-se que o torque aplicado pelo meio sobre o mesmo pode ser dado como (Fossen, 2012):

$$\tau_R = -M_A \dot{v} + -C_A(v)v - D(v)v - g(\eta) \quad (3.33)$$

onde os termos com matrizes de massa adicionada e coriolis [$M_A \dot{v}$ e $C_A(v)v$] são esforços causados pela inérgica massa adicionada, $g(\eta)$ vem pelas forças restauradoras do empuxo e do peso dos veículos e o termo $D(v)v$ surge da resistência do fluido ao deslocamento (Fossen, 2002)

A equação dinâmica para o movimento do Nerov e do BA-1 fica representada da seguinte maneira:

$$M\dot{v} + C(v,\eta)v + D(v,\eta)v + g(\eta) = \tau \quad (3.34)$$

A equação (3.34) não difere da (3.18), visto que v_r depende de v e η .

Sendo que as matrizes de massa adicionada M , de Coriolis e centrípeta $C(v,\eta)$ e de amortecimento $D(v,\eta)$ são calculadas por:

$$M = M_{RB} + M_A \quad (3.35)$$

$$C(v,\eta) = C_{RB}(v,\eta) + C_A(v,\eta) \quad (3.36)$$

$$D(v,\eta) = D_p(v,\eta) + D_s(v,\eta) + D_w(v,\eta) + D_M(v,\eta) \quad (3.37)$$

3.3.4 Massa adicionada

Para o cálculo das forças e momentos causados pela massa adicionada é prático separá-la em termos de matrizes de inércia adicionada M_A e de Coriolis e Centrípeta Hidrodinâmica, denotada por $C_A(v,\eta)$. Conforme Fossen (2012), a dinâmica de um veículo com 6 GDL se torna extremamente não linear e acoplada com o aumento da velocidade, contudo, pode-se desconsiderar os termos fora da diagonal principal da matriz de massa adicionada considerando fatores como: velocidades moderadas e planos de simetria. Portanto, a matriz de massa adicionada é expressa da seguinte maneira:

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

3.3.5 Matriz de Coriolis e centrípeta

Conforme Fossen(1994), para o cálculo da matriz de Coriolis e centrípeta hidrodinâmica tem-se que:

$$C_A(v,\eta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & K_{\dot{p}}p & X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

3.3.6 Matriz hidrodinâmica de amortecimento

Conforme Fossen (1994), os amortecimentos hidrodinâmicos em veículos subaquáticos são principalmente causados por:

- $D_M(v)$: Amortecimento ocasionado pelo desprendimento de vórtices;
- $D_S(v)$: Atritos superficiais ocasionados nas camadas limite laminares e turbulentas;
- $D_P(v)$: Amortecimento potencial da induzido pelas oscilações do veículo;
- $D_W(v)$: Amortecimento ocasionado pela correnteza.

Portanto, a matriz de amortecimento hidrodinâmico pode ser descrita como o somatório de todos os componentes listados acima, torna-se da seguinte maneira:

$$D(v) = D_P(v) + D_S(v) + D_W(v) + D_M(v) \quad (3.40)$$

Onde $D(v)$ satisfaz a Propriedade 3.2:

Propriedade 3.2 (Matriz hidrodinâmica de amortecimento $D(v)$): Para um corpo rígido, que se move através de um fluido ideal, a matriz de hidrodinâmica de amortecimento será real, não simétrica e estritamente positiva no domínio do conjunto real de sexta ordem, então:

$$D(v) > 0 \quad \forall v \in \mathbb{R}^6 \quad (3.41)$$

3.3.7 Forças Restauradoras

De acordo com Fossen (1994), as forças restauradoras são as forças peso e empuxo atuando no veículo subaquático, sendo que a primeira é aplicada ao centro de gravidade $r_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ do VSA, ao passo em que a segunda age no centro de empuxo do veículo $r_B = [x_B \ y_B \ z_B]^T$. De acordo com a notação da SNAME (1950), as forças de peso submerso e empuxo são definidas, respectivamente, como:

$$W = mg \quad (3.42)$$

$$B = \rho g \nabla V \quad (3.43)$$

onde ρ é a densidade do meio e ∇V é o volume do fluido deslocado.

Pode-se transformar as forças peso e empuxo para o sistema de coordenadas do corpo fixo, utilizando a orientação do veículo (η_2) (Fossen, 2002):

$$f_G(\eta_2) = J_1^{-1}(\eta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$f_B(\eta_2) = J_1^{-1}(\eta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Sendo assim, as equações de forças e momentos podem ser descritas como:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} f_G(\eta) + f_B(\eta) \\ r_G \times f_G(\eta) + r_B \times f_B(\eta) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Pode-se expandir essa fórmula para a seguinte forma matricial:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)s\theta \\ -(W - B)c\theta s\phi \\ -(W - B)c\theta c\phi \\ -(y_G W - y_B B)c\theta c\phi + (z_G W - z_B B)c\theta s\phi \\ (z_G W - z_B B)s\theta + (x_G W - x_B B)c\theta c\phi \\ -(x_G W - x_B B)c\theta s\phi - (y_G W - y_B B)s\theta \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

3.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo fez-se uma revisão sobre os conceitos de cinemática e dinâmica, que foram aplicados na simulação numérica dos dois veículos estudados neste trabalho. Explicou-se sobre os dois tipos de referencial, inercial e móvel, e citou-se três métodos de transformação do referencial móvel para o fixo, dando foco ao método dos ângulos de Euler. A relação entre as forças e momentos e o torque nos propulsores é exibida no Capítulo 4. Mostrou-se que a dinâmica dos VSA deste trabalho consiste em 6 graus de liberdade não lineares que são completamente acoplados. Para lidar com esse problema, será utilizado o método da realimentação linearizante, conforme é demonstrado no Capítulo 5.

Capítulo 4

4. Formulação matemática dos propulsores

4.1 Introdução

A importância de modelar o sistema de propulsão é quantificar as relações que estabelecem o mapeamento apropriado entre o esforço de controle requerido pelo controlador e os atuadores do veículo (Souza, 2003). A formulação matemática da dinâmica de um propulsor pode ser dividida em duas partes:

- Hidrodinâmica: Interação entre o fluido, o propulsor e o veículo;
- Dinâmica do atuador: Em muitos casos é um motor elétrico, do tipo Corrente Contínua (CC).

A propulsão de um veículo submarino é feita pela ativação dos propulsores dos motores elétricos. As equações que governam o torque físico (Q) e a força de propulsão (T), desenvolvidas pelos propulsores, são dadas por (Tavares, 2003):

$$T = C_T(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_w^2 + (0,7 + \pi n_p D)^2] \pi D^2 \quad (4.1)$$

$$Q = C_Q(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_w^2 + (0,7 + \pi n_p D)^2] \pi D^3 \quad (4.2)$$

Nas equações 4.1 e 4.2, v_w é a velocidade d'água direcionada para um propulsor, D é o diâmetro da hélice do propulsor, n é a velocidade angular da hélice do propulsor e os coeficientes $C_T(\sigma)$ e $C_Q(\sigma)$ são funções do ângulo de avanço do propulsor, obtidos pelas curvas hidrodinâmicas características dos propulsores.

A variável σ corresponde ao ângulo de avanço da entrada d'água no propulsor, e é calculada pela equação 4.3:

$$\sigma = \tan^{-1} \left(\frac{v_w}{0,7\pi n D} \right) \quad (4.3)$$

Considerando que a velocidade da água v_w , que entra no propulsor, equivalente à velocidade relativa do veículo, tem-se que o ângulo de avanço é nulo ($\sigma = 0$). Portanto, conforme Fossen (2012) e Tavares (2003), o torque e o momento podem ser descritos pelas equações 4.4 e 4.5:

$$T = T_{|n||n|} |n|n \quad (4.4)$$

$$Q = Q_{|n||n|} |n|n \quad (4.5)$$

em que $T_{|n||n|} = C_T(0^\circ)\rho(0,7)\pi^3\frac{D^4}{8}$ é o coeficiente de empuxo e $Q_{|n||n|} = C_Q(0^\circ)\rho(0,7)\pi^3\frac{D^4}{8}$ é o coeficiente de torque. Em ambos os casos se negligencia a velocidade d'água quando entra no propulsor.

Com isso, motores elétricos CC são usados como atuadores e a equação dinâmica dos mesmos pode ser representada por:

$$L_a \frac{di_a}{dt} = -R_a i_a - 2\pi K_m n + V_a \quad (4.6)$$

Na equação (4.6), i_a é a corrente da armadura do motor, V_a é a tensão de entrada no motor, R_a é a resistência da armadura, L_a é a indutância da armadura e K_m é a constante eletromagnética do motor.

Para transformar a velocidade angular do motor de revoluções por segundo em radianos por segundo, utilizou-se a constante 2π . A constante de tempo do circuito do motor é menor que a constante de tempo mecânica (Tavares, 2003), logo o coeficiente $L_a \frac{di_a}{dt}$ pode ser desprezado e tem-se a seguinte equação:

$$-R_a i_a - 2\pi K_m n + V_a = 0 \quad (4.7)$$

$$2\pi J_p \frac{dn}{dt} = T_m - Q \quad (4.8)$$

Onde J_p é o momento de inércia resultante do rotor e do propulsor, T_m é o torque do motor CC e Q é o torque resistente dado pelas interações dinâmicas entre o propulsor e a água. Para este trabalho, o torque foi considerado diretamente proporcional à corrente aplicada, sendo descrito por:

$$T_m = K_m i_a \quad (4.9)$$

Dessa forma, encontra-se a equação que relaciona a dinâmica da tensão de entrada do motor e a força exercida pelo propulsor:

$$V_a = \left[2\pi \dot{n} J_p + 2\pi \frac{K_m^2}{R_a} n + Q_{|n||n|} |n||n| \right] \frac{R_a}{K_m} \quad (4.10)$$

4.2 Configuração dos propulsores:

Sendo $\tau \in \mathbb{R}^5$ o vetor resultante de forças e momentos atuando no veículo, conforme foi exibido na equação (3.18). O termo $T \in \mathbb{R}^6$ é o vetor de forças dos propulsores, então, a relação entre τ e T é dada por:

$$\tau = BT \quad (4.11)$$

Na equação (4.11), $B \in \mathbb{R}^{5 \times 6}$ é a matriz de configuração dos propulsores e seus elementos são determinados pela configuração geométrica dos propulsores (Choi e Kondo, 2010). Com isso, a equação 4.11 pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} \tau_H \\ \tau_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_H & 0_{3 \times 2} \\ 0_{2 \times 4} & B_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_H \\ T_V \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Onde:

$$T_H = (T_1, T_2, T_3, T_4)^T \in \mathbb{R}^4$$

$$T_V = (T_5, T_6)^T \in \mathbb{R}^2$$

$$\tau_H = (F_x, F_y, M_z)^T \in \mathbb{R}^3$$

$$\tau_V = (F_z, M_y)^T \in \mathbb{R}^2$$

Os termos F_x , F_y e F_z são respectivamente as forças resultantes agindo ao longo dos eixos X, Y e Z do referencial de corpo do VSA enquanto M_y e M_z são os momentos resultantes ao redor dos eixos Y e Z. Já os termos T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 e T_6 correspondem às forças exercidas pelos propulsores, conforme foi mostrado na equação (4.4). Adicionalmente, B_H e B_V são as matrizes de configuração associadas aos propulsores horizontais e verticais, onde seus elementos são descritos por:

$$B_H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -a & a & b & -b \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$B_V = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -c & c \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Nas equações acima, o termo a é a distância entre o centro de massa do VSA, que corresponde ao centro geométrico, e o eixo dos propulsores 1 e 2 da mesma forma que o termo b está para os propulsores 3 e 4 e o termo c está para os propulsores 5 e 6.

Constata-se que os termos τ_H e τ_V são independentes entre si, portanto pode-se dividir a equação 4.12 nas equações de forças e momentos horizontais e verticais:

$$\tau_H = B_H T_H \quad (4.15)$$

$$\tau_V = B_V T_V \quad (4.16)$$

A disposição geométrica dos propulsores do veículo BA-1 é exibida na figura 4.11, onde observa-se que os movimentos horizontais são produzidos pelos propulsores 1, 2, 3 e 4, enquanto os propulsores 5 e 6 são responsáveis pelos movimentos verticais.

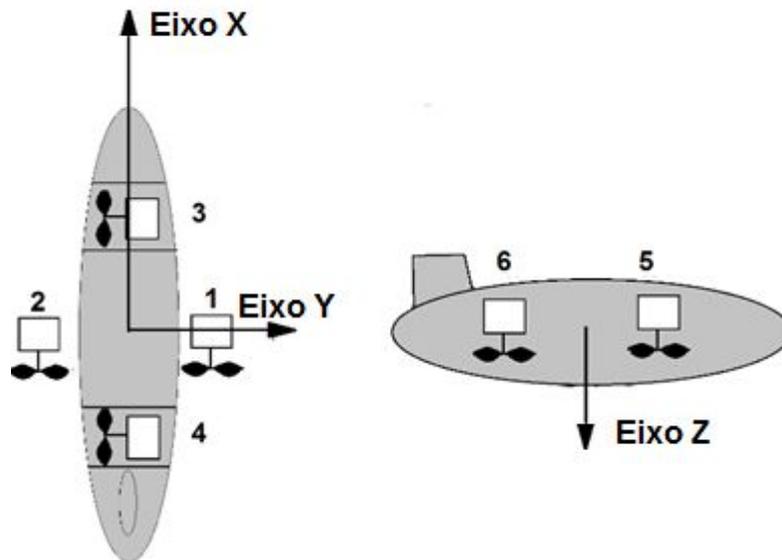


Figura 4.1: Configuração dos propulsores do BA-1.
Fonte: Kondo *et al.*, 2010.

Dessa forma, o VSA BA-1 é capaz de gerar os movimentos nos 3 eixos, apesar do movimento de rolagem não ser utilizado por ser estabilizado pelos atuadores do veículo (Santos, 2012). O mesmo conceito pode ser aplicado ao veículo Nerov, pois esse também possui 4 propulsores horizontais e 2 verticais.

4.3 Definição do plano de ação

Conforme Omerdic (2009), os propulsores de veículos subaquáticos podem ter a seguinte classificação:

- Propulsores túnel: Estes são os propulsores transversais atravessando o casco do veículo. A unidade da hélice está montada dentro de um tubo transversal e produz uma força F_x na direção x .
- Superfícies de controle: as superfícies de controle podem ser instaladas em diferentes locais para produzir forças de sustentação e arrasto, como nadadeira, lemes para direção etc.
- Propulsores direção fixa (sem rotação): propulsores direção fixa são caracterizados com ângulo fixo ($\alpha = \alpha_0$), isto é, a orientação destes propulsores está fixada antecipadamente e não pode ser alterada durante a missão.
- Propulsores de azimute: unidades de propulsão que são capazes de movimentos de rotação, onde um ângulo α é feito pelo eixo z durante a missão, produzindo duas componentes de força (F_x, F_y) no plano horizontal. Tem-se a vantagem de otimizar em relação à potência e possíveis situações defeituosas e a desvantagem para aumentar a complexidade do controle tolerante a falhas, já que sua mecânica é mais complexa (Santos (2016), apud Omerdic (2009)).

Neste trabalho, utiliza-se a configuração de propulsores em formato de cruz para o modelamento matemático. Santos (2016) cita que as configurações em formato de cruz e em formato de X são as mais usuais comercialmente. Ambas as configurações são descritas na figura 4.2, nas quais e_1 , e_2 , e_3 e e_4 representam a direção positiva de propulsão e α é o ângulo do propulsor em relação ao eixo y .

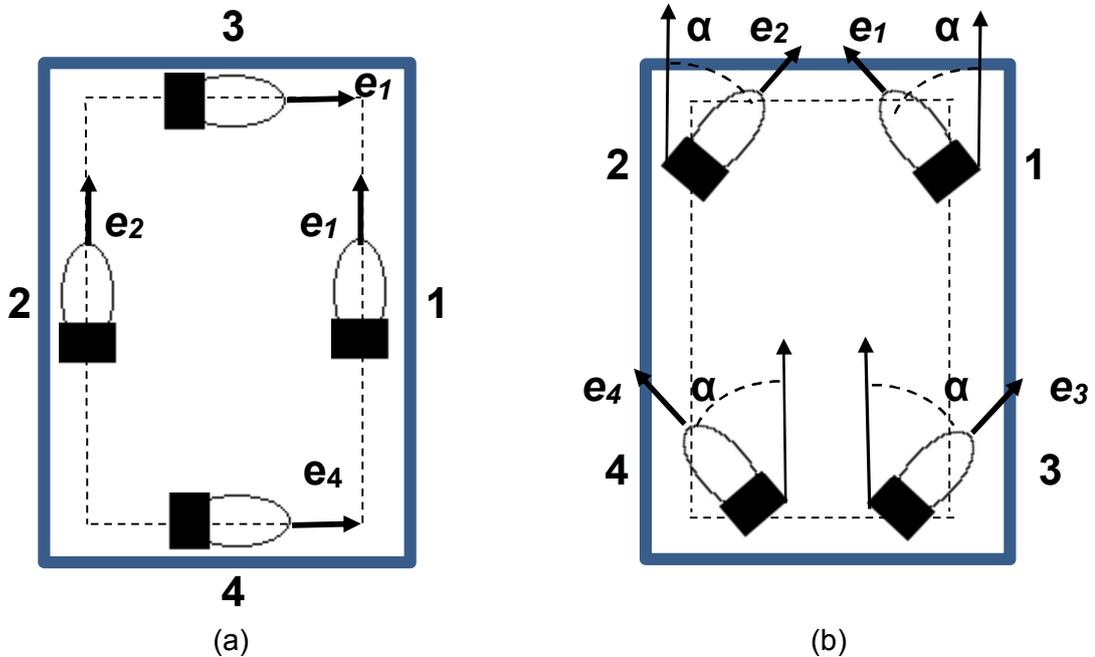


Figura 4.2: Configuração dos propulsores no veículo: (a) Configuração em cruz e (b) Configuração em formato de X. Fonte: Santos, 2016.

Santos (2016) cita, em sua obra, a definição de plano de ação, que é descrita da seguinte maneira:

Definição 4.1: O plano de ação é o eixo ou plano formado por um componente, ou um conjunto de componentes de forças, que definem a força resultante que atua neste plano.

Conforme a definição 4.1, para a configuração em cruz, tem-se que os planos de ação são formados pelo eixo x (plano de ação 1) e pelo eixo y (plano de ação 2), que são mostrados na figura 4.3 (a). Enquanto que, para a configuração em formato de X, exibida na figura 4.4 (b), tem-se que os planos de ação são formados pelas forças resultantes dos propulsores 1 e 2 (plano de ação 1) e pelos propulsores 3 e 4 (plano de ação 2).

Na figura 4.3 (a) a representa a distância horizontal do centro do VSA aos eixos dos propulsores horizontais 1 e 2; b equivale à distância vertical do centro do VSA aos eixos dos propulsores horizontais 3 e 4; c , que não é mostrado na figura 4.3, representa a distância vertical do centro do VSA em relação aos propulsores verticais.

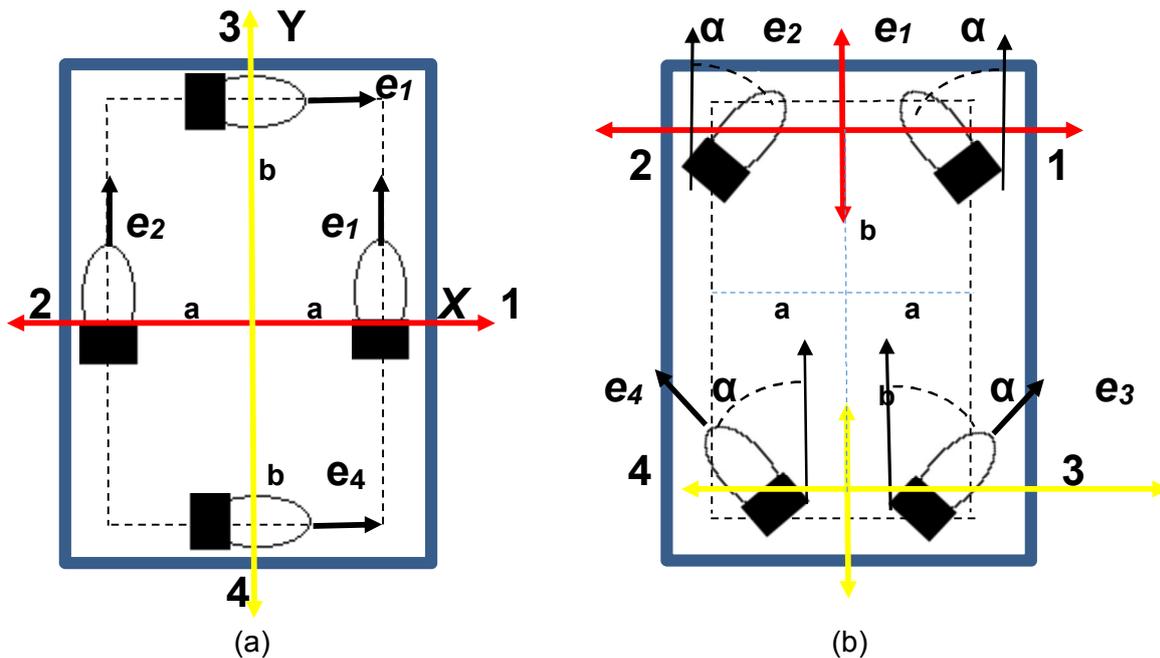


Figura 4.3: Configuração dos planos de ação: vermelho – plano de ação 1; amarelo – plano de ação 2. Fonte: Santos, 2016.

Levando-se em consideração que a configuração dos VSA Nerov e BA-1 são do tipo em cruz, implementou-se essa configuração. Santos (2016) cita que a configuração em X é comumente utilizada em VSRO, Desta forma, conforme será discutido no Capítulo 9, pode-se distribuir a força dos propulsores faltantes em outros propulsores, desde que se encontrem no mesmo plano de ação.

4.4 Resumo do capítulo

Apresentou-se neste capítulo o equacionamento inerente ao processo de modelagem do sistema de propulsão de veículos subaquáticos. Mostrou-se como os torques desenvolvidos pelos propulsores se relacionam com as forças e momentos aplicados nos veículos. Além disso, definiu-se o conceito de plano de ação e a configuração do sistema de propulsão do Nerov e do Biointeractive-1, que é em cruz.

Capítulo 5

5. Linearização por realimentação de estados aplicada em veículos subaquáticos

Neste capítulo será mostrada a técnica de linearização por realimentação de estados, a qual lida com as não linearidades de um sistema tornando-o linear. Primeiramente, será apresentada a premissa desta técnica de controle, bem como sua finalidade. Em seguida, será mostrado do equacionamento matemático, demonstrando como se transforma um sistema não linear em um sistema linear, passível de se utilizar a técnica de controle Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID) (Fossen, 1994).

5.1 Introdução

De acordo com Fossen (1994), a técnica de realimentação linearizante é completamente aplicável em VSA, pois consegue lidar com as variáveis não lineares e completamente acopladas, de forma a deixar o VSA controlável e desacoplado em seus estados. Tavares (2003) aborda que o principal objetivo deste tipo de controle é a validade da transformação de um sistema não linear em um sistema linear em todos os espaços de estados.

O objetivo do controlador é transformar a dinâmica do VSA em um sistema linear. Para isso, o vetor de aceleração comandada no referencial móvel a_v deve ser equivalente à aceleração móvel desejada \dot{v} (Fossen, 1994):

$$\dot{v} = a_v \quad (5.1)$$

Tavares (2003) alerta que, um sistema perfeitamente linear, é impossível devido aos distúrbios externos, os quais não podem ser perfeitamente previstos devido às incertezas existentes no modelamento matemático feito com base no ambiente físico.

5.2 Formulação Matemática

Considerando-se a dinâmica e a cinemática dos VSA Nerov e BA-1, descrita no capítulo 3, pode-se isolar as não linearidades da seguinte maneira (Fossen, 19):

$$N(v, \eta) = C(v, \eta)v + D(v, \eta)v + g(\eta) \quad (5.2)$$

Em seguida cancelam-se as não linearidades ao utilizar a seguinte lei de controle (Fossen, 1994):

$$\tau = Ma_v + N(v, \eta) \quad (5.3)$$

Considerando a seguinte formulação matemática dos VSA, a partir de (3.17), (3.34) e (5.2):

$$\tau = M\dot{v} + N(v, \eta) \quad (5.4)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (5.5)$$

Igualando a equação 5.4 a equação 5.3, tem-se:

$$M(\dot{v} - a_v) = 0 \quad (5.6)$$

Pode-se diferenciar em relação ao tempo a velocidade no referencial inercial ($\dot{\eta}$) na equação 5.5 e isolar a aceleração móvel (\dot{v}), obtendo (Fossen, 2012):

$$\dot{v} = J(\eta)^{-1}(\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)v) \quad (5.7)$$

Substituindo o termo \dot{v} obtido pela equação 5.7 na equação 5.6 e multiplicando por $J(\eta)^{-T}$

$$M(\dot{v} - a_v) = J(\eta)^{-T} MJ(\eta)^{-1}(\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)v - J(\eta)a_v) = 0 \quad (5.8)$$

Definindo

$$M_\eta = J(\eta)^{-T} MJ(\eta)^{-1} \quad (5.9)$$

$$a_\eta = J(\eta)\dot{v} - \dot{J}(\eta)a_v \quad (5.10)$$

Na equação 5.9, o termo M_η representa a matriz de inércia no referencial inercial. Enquanto que, na equação 5.10, o termo a_η representa a aceleração comandada no referencial inercial.

Então, é possível obter um sistema linear desacoplado no referencial inercial expresso por:

$$M_\eta(\ddot{\eta} - a_\eta) = 0 \quad (5.6)$$

Conforme Fossen (1994), isso sugere que a aceleração comandada no referencial inercial a_η é a solução deste problema ($\ddot{\eta} = a_\eta$) e pode ser definida por vários métodos, tais como: o regulador linear quadrático e o controle Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID). Neste trabalho, utilizou-se a seguinte lei de controle PID:

$$a_\eta = \ddot{\eta}_d - K_P\tilde{\eta} - K_D\dot{\tilde{\eta}} - K_I\int\tilde{\eta}dt \quad (5.7)$$

onde $\tilde{\eta}$, $\dot{\tilde{\eta}}$ e $\ddot{\tilde{\eta}}$ são respectivamente o erro e a derivada do mesmo em função do tempo, enquanto K_P , K_D e K_I são, respectivamente, os ganhos proporcional, derivativo e integrativo.

Conforme Fossen (2012), esses termos são selecionados de forma que o erro dinâmico seja estável o mínimo possível, conforme:

$$K_P \tilde{\eta} + K_D \dot{\tilde{\eta}} + K_I \int \tilde{\eta} dt = 0 \quad (5.8)$$

Então, calcula-se a aceleração comandada pela lei de controle o referencial do corpo móvel mediante a matriz de transformação de velocidades $J(\eta)$ e a_η :

$$a_v = J(\eta)^{-1} [a_\eta - \dot{J}(\eta)v] \quad (5.9)$$

O diagrama de blocos da figura 5.1 representa, esquematicamente, a estrutura da lei de controle por realimentação de estados. Nela, os termos η_d , $\dot{\eta}_d$ e $\ddot{\eta}_d$ são respectivamente: posição desejada, velocidade desejada e aceleração desejada.

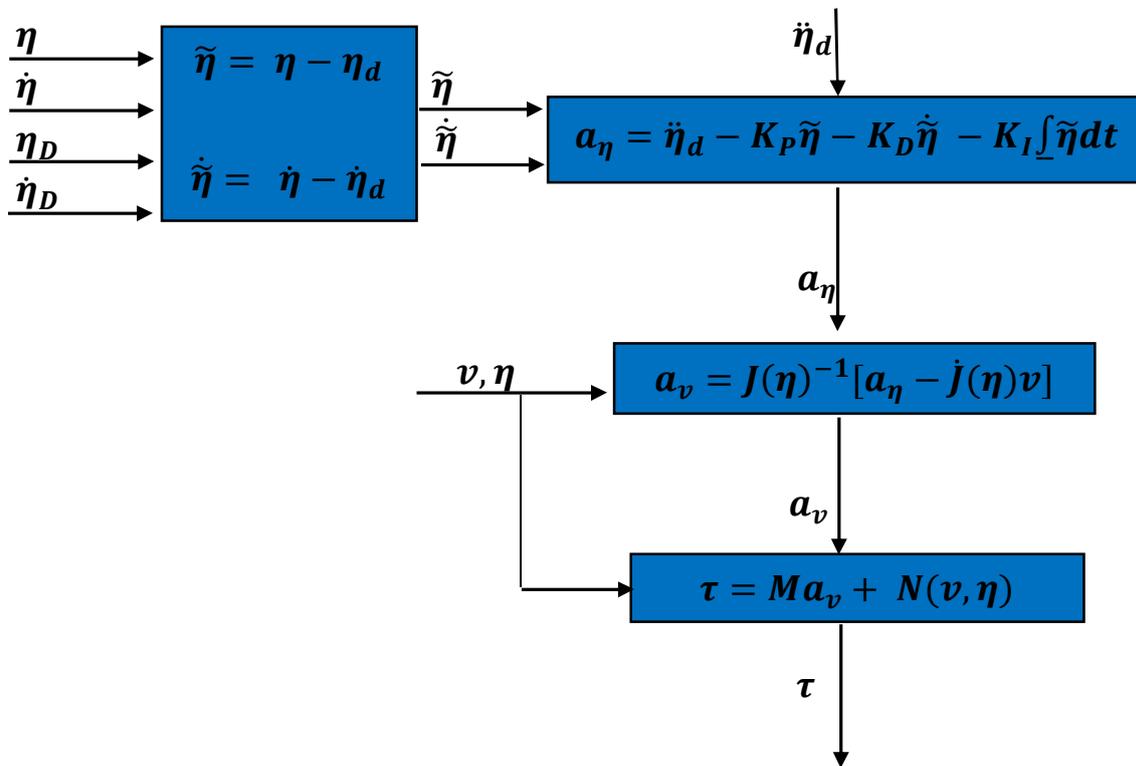


Figura 5.1: Estrutura da lei de controle por realimentação de estados.
Fonte: Fossen, 1994.

5.3 Resumo do capítulo

A estratégia de controle utilizada para o controle de trajetória, PID com realimentação linearizante, foi exibida neste capítulo. Levou-se em consideração o modelamento matemático proposto por Fossen (1994) no simulador numérico desenvolvido e, conforme é abordado no Capítulo 10, os valores de K_P , K_D e K_I fornecidos por Santos (2012) e por Tavares (2003).

Capítulo 6

6. Controle tolerante a faltas

6.1 Introdução

Neste capítulo serão abordados os temas referentes às leis de controle e às metodologias envolvidas no desenvolvimento do Controle Tolerante a Faltas (CTF). Serão exibidos conceitos de falta e falha, além dos estudos já feitos por Omerdic (2009) e Blanke *et al.* (2006).

O CTF deve lidar com as faltas e as falhas dos componentes de um sistema para que esse possa executar satisfatoriamente a missão proposta. Um dos fatores cruciais em um veículo subaquático e que pode ocasionar a falha da missão, custos excessivos e ainda gerar a perda do veículo, é a falta de propulsores. Portanto, o desenvolvimento de um CTF para um VSA pode evitar a perda do veículo e inclusive adiar a execução da manutenção do mesmo.

6.2 Conceitos de faltas e falhas

De acordo com Omerdic (2004), o conceito de falha remete a um desvio permanente da condição tolerável de, pelo menos, uma das características ou propriedades de um sistema. Ao passo em que a falta, é tida como cessão permanente da execução de uma função requerida em condições específicas.

Tomando como exemplo os veículos subaquáticos, pode-se exemplificar a situação de entrada d'água ou mesmo os galhos e cordas que se prendem aos propulsores como geradores de falta (Santos, 2016). Caso ocorra uma falta em um propulsor, este não desempenhará a sua função requerida, contudo, se o mesmo operar com uma queda de velocidade de rotação, tem-se uma condição de falha.

Além da definição de falta e falha, Omerdic (2004) aborda as seguintes terminologias:

- **Acomodação de faltas:** Mudança nos parâmetros do controlador ou da estrutura para evitar as consequências da falta. Logo, o objetivo do controle é obtido apesar da queda do desempenho;
- **Deteção de faltas:** Determinação das faltas presentes em um sistema e do tempo de detecção;
- **Isolamento de faltas:** Processo de reconfiguração do sistema de controle a fim de isolar a falta e manter o sistema em funcionamento;
- **Diagnóstico de faltas:** Determinação do tipo, tamanho, localização e tempo de detecção de uma falta. Inclui a detecção de faltas, isolamento e identificação;
- **Tolerância a faltas:** É a capacidade de um sistema controlado manter os objetivos de controle, apesar da ocorrência da falta e da perda de performance. Duas formas de obter-se a tolerância a faltas são: por meio da acomodação de faltas e reconfiguração do controlador;
- **Reconfiguração:** Mudança na relação de entradas e saídas entre o controlador e o sistema por meio da mudança da estrutura do controlador e dos parâmetros;

- **Supervisão:** Trata-se da habilidade de monitorar se os objetivos de controle são mantidos. Caso contrário, deve-se obter um objetivo de controle revisado, uma nova estrutura de controle e novos parâmetros de estrutura que façam que o controle em malha fechada do sistema faltante, atenda aos novos objetivos. A supervisão surte efeito se faltas ocorrem e não é possível atender aos objetivos pré-estabelecidos dentro do cenário tolerância a faltas;
- **Resíduo:** Indicador de falta baseado no desvio entre a medição dos sensores e a previsão computacional baseada no modelo matemático do sistema;
- **Sintoma:** Uma mudança de uma quantidade observável partindo de um comportamento observável.

6.3 Conceitos de controle tolerante a faltas

Conforme Cardozo (2013, apud Jiang e Yu (2012)), o CTF pode ocorrer partindo de uma previsão das faltas e das falhas que podem surgir no veículo ainda na fase de projeto, criando-se assim um CTF passivo. Além disso, pode-se projetar um CTF que lide com as faltas durante a trajetória. Para isso, deve-se ter um sistema de sensoriamento capaz de realizar a Detecção e Diagnóstico de Faltas (DDF), de forma a reorganizar os atuadores do sistema para alterar as entradas e saídas entre o sistema e o controlador. Portanto, conforme Kang (2014), o CTF ativo toma ações corretivas por meio do mecanismo de reconfiguração, o qual adapta o sistema de controle dependendo do tipo de falhas de um determinado sistema. Na figura 6.1 mostra-se um exemplo de um CTF ativo aplicado na tolerância a faltas de propulsores em VSA.

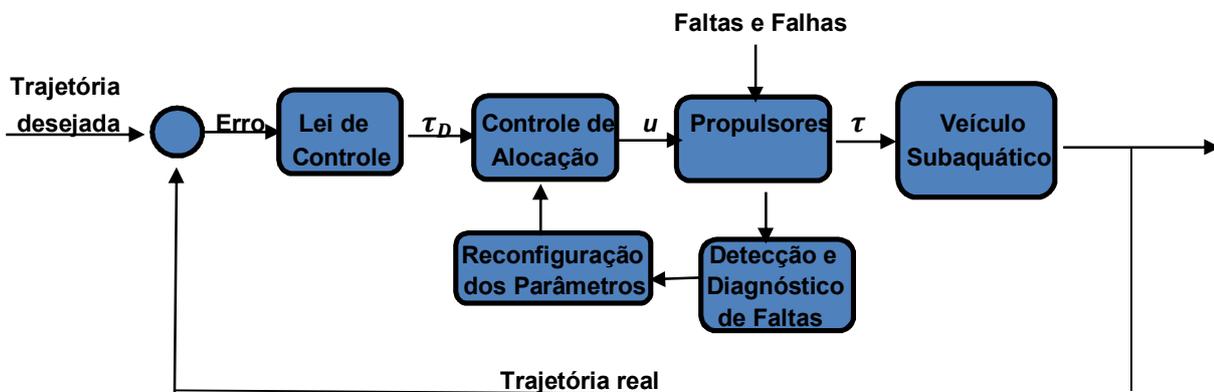


Figura 6.1: Estrutura geral de um Controlador Tolerante a Faltas Ativo.
Fonte: Omerdic, 2009.

onde τ_D é o vetor de forças e momentos desejados, u é o vetor de forças em cada propulsor e τ é o vetor de forças e momentos efetivos aplicados ao VSA.

Para os CTF passivos, não ocorre a detecção e o diagnóstico de faltas nem a reconfiguração dos parâmetros. Ocorre a previsão das faltas ocorrerem durante a fase de projeto (Omerdic, 2009). Na figura 6.2, exibe-se a estrutura de controle geral de um CTF passivo que, conforme Cardozo (2014) apud Jiang e Yu (2012), tem como característica a simplicidade e a compactação. Além disso, tem como objetivo a robustez e a estabilidade de um sistema controlado.

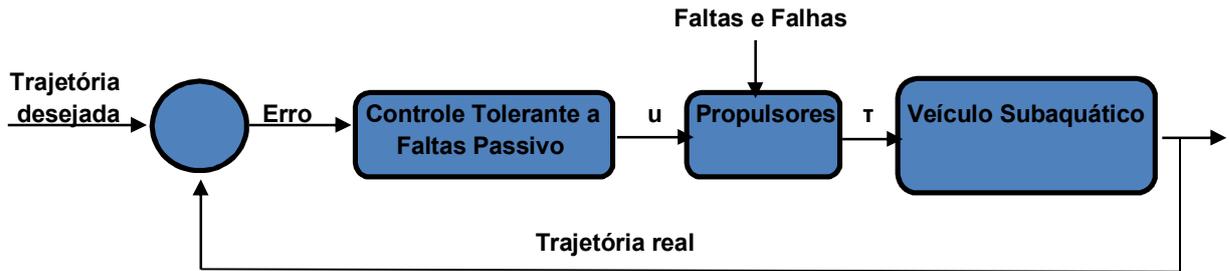


Figura 6.2: Estrutura geral de um Controlador Tolerante a Falhas Passivo.
Fonte: Omerdic, 2009.

6.4 Classificação de métodos de diagnóstico de falhas

De acordo com Omerdic (2009), os métodos de diagnóstico de falhas podem ser classificados em sistemas que utilizam um modelo matemático da planta (Métodos Livres de Modelos) e sistemas que não utilizam modelos matemáticos (Métodos Baseados em Modelos). Na figura 6.3 exibe-se a separação dos dois métodos de diagnósticos de falhas, que serão tratados nas subseções seguintes, e as suas divisões.

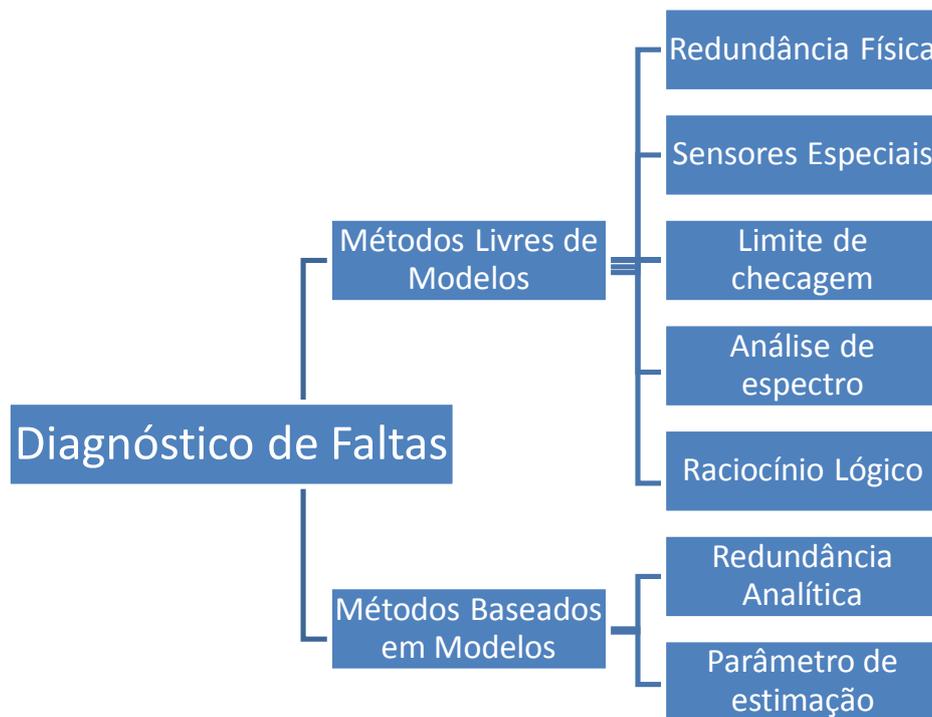


Figura 6.3: Classificação dos métodos de diagnóstico de falha.
Fonte: Omerdic, 2009.

6.4.1 Métodos Livres de Modelos

Conforme a Figura 6.3 pode-se utilizar 5 diferentes tipos métodos capazes de diagnosticar a falha sem utilizar o modelo matemático (Omerdic, 2009):

- Redundância Física: Uma mesma quantidade física é medida por diferentes sensores. Ocorre uma falha caso ocorra uma elevada discrepância entre as medidas dos sensores;

- **Sensores Especiais:** Neste caso, tem-se sensores instalados exclusivamente para a detecção e diagnóstico de falta, os quais podem ser sensores de temperatura, pressão etc;
- **Limite de checagem:** Ao definir limites para algumas variáveis da planta, pode-se determinar que a falta ocorre quando tais limites são ultrapassados. Na prática, tem-se dois limites: um de pré-aviso e outro para uma reação de emergência;
- **Análise de espectro:** Partindo da premissa que a maioria dos sistemas controlados possuem um espectro de frequências quando operam em condições normais, tem-se que qualquer desvio dessa frequência indica uma anormalidade, que pode ser uma falta. A vantagem deste método é que podem ter uma alteração característica no espectro de frequência, portanto, facilitando no isolamento da falta;
- **Raciocínio Lógico:** Aplicando o raciocínio lógico com regras, premissas e conclusões, pode-se chegar na detecção da falta. Para aplicar este método, é necessário ter um devido sensoriamento do sistema em questão.

6.4.2 Métodos Baseados em Modelos

Conforme Omerdic (2009), os métodos de diagnóstico de faltas baseados em modelos utilizam um modelo matemático explícito do sistema monitorado aliado ao sistema de sensoriamento. Podemos destacar os seguintes métodos:

6.4.2.1 Redundância Analítica

Por meio da geração de quantidades residuais, obtém-se a determinação da falta. Essas quantidades são obtidas realizando uma comparação das medidas disponíveis no sistema, com a informação obtida pelo modelo matemático do sistema. Ou seja, os valores obtidos pela medição dos sensores são comparados com os valores estimados pelo equacionamento matemático e a diferença entre os dois é o resíduo. Na figura 6.4 mostra-se o exemplo da redundância analítica.

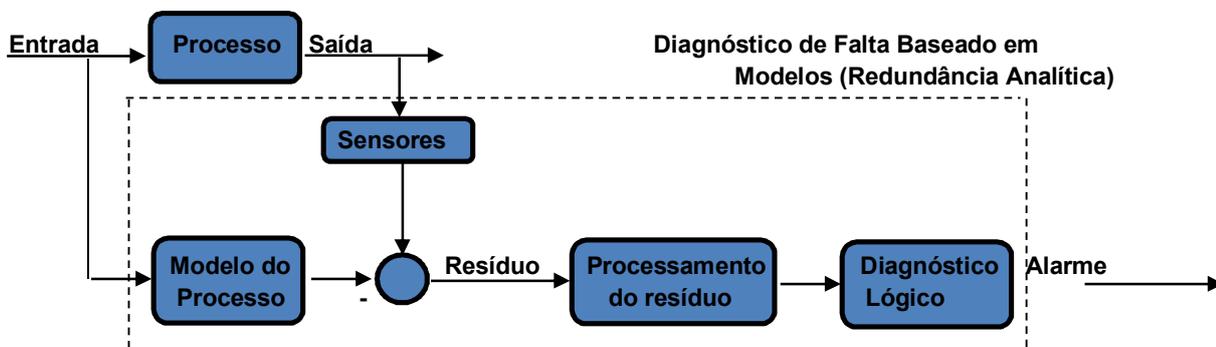


Figura 6.4: Diagnóstico de Falta Baseado em Modelos (Redundância Analítica).
Fonte: Omerdic, 2009.

Pode-se também aplicar a redundância de *hardware*, vide figura 6.5, na qual tem-se um conjunto extra de sensores que visam identificar medições que contrastem e, desta forma, identifiquem uma falta no sistema.

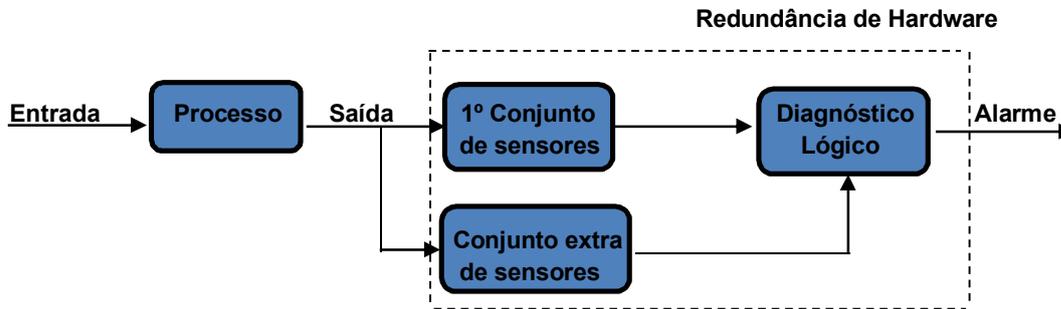


Figura 6.5: Diagnóstico de Falta Baseado em Modelos (Redundância de Hardware).
Fonte: Omerdic, 2009.

Em casos práticos o resíduo nem sempre é nulo, pois tem-se a complexidade em se modelar matematicamente com perfeição um determinado sistema e a imprecisão inerente ao sistema de sensoriamento. Para solucionar esse problema realiza-se um processamento dos resíduos gerados visando distinguir as faltas das incertezas de modelagem do sistema e da medição.

A estrutura geral do diagnóstico de falta de um sistema baseado em modelos consiste em dois estágios principais: geração de resíduo e estimativa de parâmetros (Omerdic, 2009)

6.4.2.1.1 Geração de resíduo:

Utiliza-se a entrada disponível e a informação de saída do sistema para gerar o sinal indicador de falta. Sendo assim, a geração residual é um procedimento que tem como finalidade extrair os sintomas da falta do sistema que é representado pelo sinal de resíduo. Conforme a figura 6.6, a geração de resíduo pode ser dividida em duas categorias, sendo uma baseada em sinais e outra baseada em modelos com subdivisões (Omerdic, 2009).

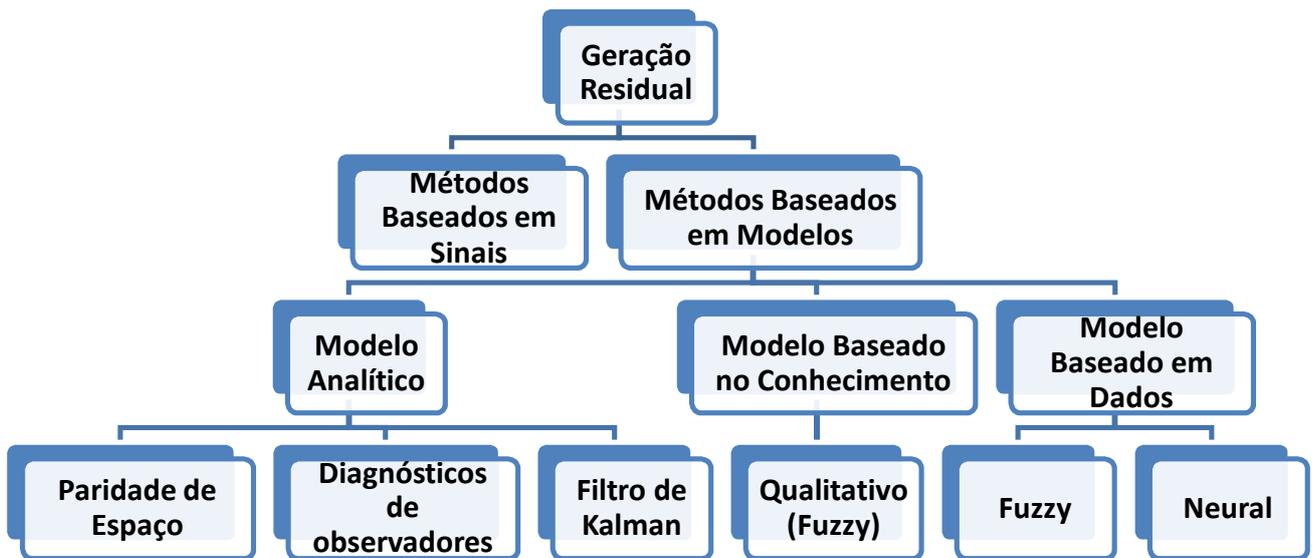


Figura 6.6: Classificação de diferentes conceitos de geração residual.
Fonte: Omerdic, 2009.

6.4.2.1.2 Avaliação Residual

A avaliação residual segue a geração residual visando detectar a falta e, se possível, isolá-la. Desta forma, os resíduos são examinados pela possibilidade de falta e, a partir de um conjunto de regras, determina-se se a falta realmente ocorreu. As técnicas para esta etapa, vide figura 6.7, podem ser baseadas em: Limites, Métodos Estatísticos e Classificação.

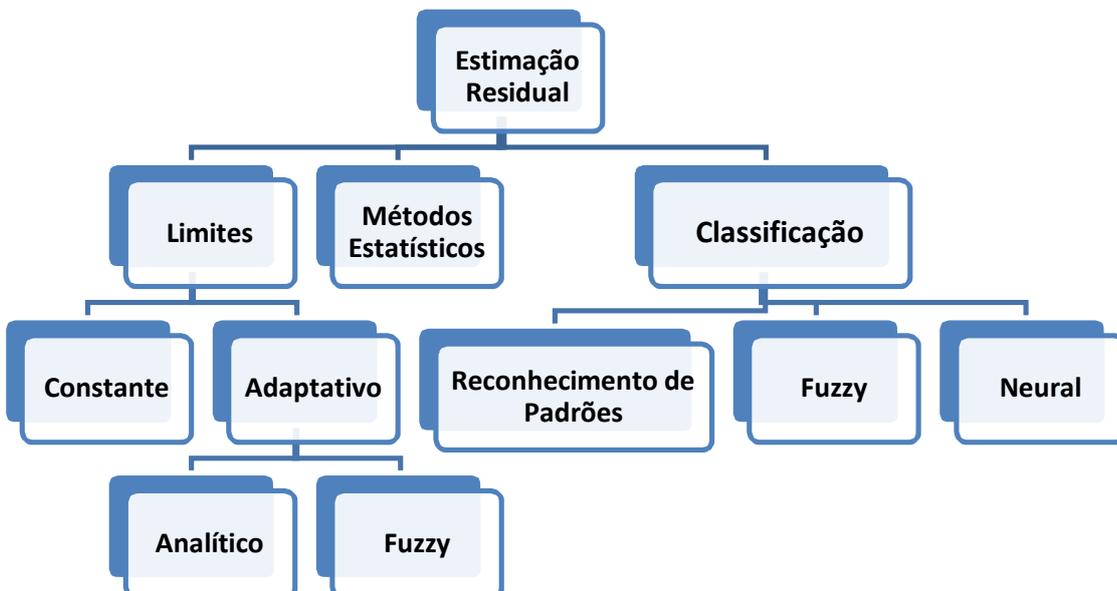


Figura 6.7: Classificação de diferentes conceitos de avaliação residual.
Fonte: Omerdic, 2009.

6.4.2.2 Estimativa de parâmetros

A estimativa de parâmetros é uma aproximação natural para a detecção e isolamento de faltas paramétricas. Primeiramente, identifica-se, no sistema controlado, a situação livre de faltas e obtém-se o modelo de referência. Em seguida, os parâmetros são recalculados repetidamente com sistema em funcionamento. Logo, os desvios do modelo de referência servem para a detecção e isolamento das faltas.

6.5 Lógica *fuzzy* no Diagnóstico de Faltas

De acordo com Omerdic (2009), a desvantagem de aproximações analíticas no diagnóstico de faltas está na imprecisão de modelos matemáticos. Além disso, há um elevado custo computacional para obterem-se melhores resultados. Utilizando a lógica *fuzzy*, podem-se implementar modelos de conhecimento e modelos baseados em dados.

6.5.1 Filtro *fuzzy* para avaliação residual

Considerando que modelos analíticos geralmente são aplicados em submodelos de um sistema, como os propulsores de um VSA, as técnicas quantitativas baseadas em modelos, podem ser usadas na detecção da falta em um determinado componente. Enquanto o conhecimento qualitativo, ou heurístico, das conexões pode ser usado para a geração de sintomas da falta do sistema completo (Omerdic, 2009). De acordo com Omerdic (2009) apud Köppen-Seliger e Frank (1999), as vantagens em se utilizar uma aproximação combinada em conhecimento e valores quantitativos são:

- Inexistência da necessidade de se construir um modelo analítico para o processo completo, sendo a construção necessária apenas aos submodelos;
- As conexões entre os submodelos podem ser descritas qualitativamente;
- O esforço computacional, comparado com o modelo analítico de todo o sistema, é reduzido;
- As causas e efeitos das faltas podem ser transferidas mais facilmente para o conceito de diagnóstico de faltas.

Na figura 6.8, mostra-se a estrutura geral de um filtro *fuzzy* para o diagnóstico de falta. Nele, a avaliação *fuzzy* residual é um processo que transforma os resíduos, ou seja conhecimento quantitativo, na indicação de falta ($\mu(f_1)$ ao $\mu(f_n)$) que é um conhecimento qualitativo. Logo, os resíduos, gerados pelos modelos analíticos dos submodelos, tornam-se a entrada do filtro *fuzzy* (Omerdic, 2009).

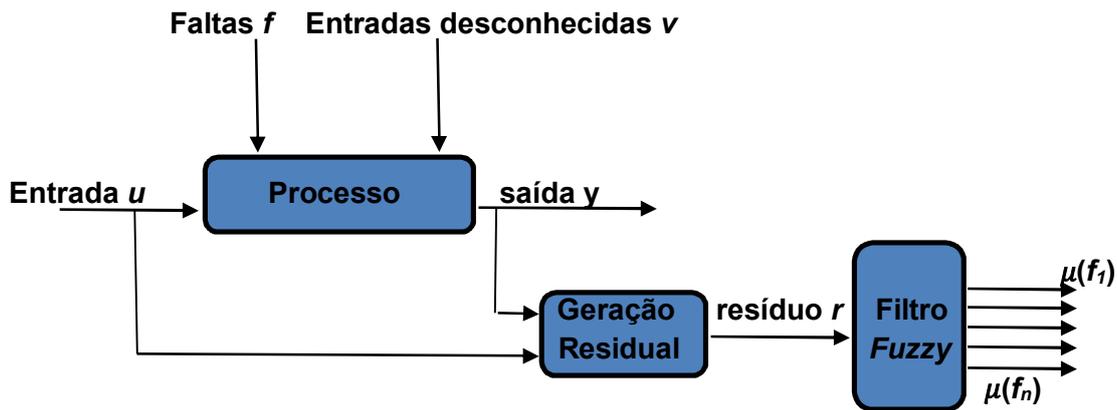


Figura 6.8: Estrutura geral de um filtro *fuzzy* para diagnóstico de falhas.
Fonte: Omerdic, 2009.

6.6 Resumo do capítulo

Neste capítulo, fez-se uma revisão sobre os conceitos de falta e falha e os diferentes tipos CTF encontrado na bibliografia de Omerdic (2009). Conforme é explicado no Capítulo 9, o CTF proposto para ambos os veículos é do tipo ativo, conforme a figura 6.2. Por se tratar de uma simulação numérica, consideraram-se a ocorrência e a detecção da falta como imediatas, portanto, o diagnóstico da falta é do tipo livre de modelos e é feito por sensores especiais. Por fim, cabe ao CTF desenvolvido lidar com as faltas e falhas com o sistema em operação (*online*).

Capítulo 7

7. Conceitos da lógica e dos controladores *fuzzy*

7.1 Introdução

Neste capítulo serão discutidos os temas referentes à lógica *fuzzy* aplicada no CTF dos VSA. Conforme Ross (1995), a lógica *fuzzy* possui a vantagem de lidar com imprecisão de sistemas dinâmicos. Houve um grande avanço a partir dos trabalhos de Zadeh (1965) que, de acordo com Pedrycz e Gomide (2007), motivou uma abordagem diferenciada na solução de alguns problemas com a publicação de trabalhos sobre os conjuntos *fuzzy*. O entendimento da maioria dos processos físicos é baseado no pensamento humano, que é impreciso, portanto, a lógica *fuzzy* é ideal para lidar com incertezas visto que simula o pensamento humano. Conforme Ross (1995), Jantzen (2007) e Bai *et al...* (2006) os sistemas baseados em regras *fuzzy* constituem uma poderosa ferramenta com aplicações em diversas áreas incluindo:

- Automação e controle;
- Previsão de séries temporais;
- Reconhecimento de padrões;
- Biomatemática.

7.2 Lógica *fuzzy*

Na lógica binária existem dois possíveis valores: verdadeiro ou falso. Com o auxílio da teoria dos conjuntos numéricos, podem-se agrupar elementos com características ou propriedades em comum. Para isso, faz-se uso de conjuntos *crisp*, que podem ser determinados por funções características, como, por exemplo, em um determinado universo de discurso A:

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \in A \\ 1, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (7.1)$$

Na equação 7.1, tem-se que $\chi_A(x)$ corresponde a função de pertinência do elemento x no universo de discurso A. Sendo assim, caso x pertença a A tem-se $\chi_A(x) = 1$ e caso não pertença $\chi_A(x) = 0$.

Zadeh (1965) estendeu o conceito de pertinência de forma que esse não mais comporta apenas dois possíveis estados, mas sim infinitos valores entre o verdadeiro e o falso. Isso permite representar vários graus de pertinência de um elemento no conjunto A definido. A função de pertinência de um determinado conjunto *fuzzy* engloba a representação matemática de quanto um elemento pertence a um determinado conjunto. Portanto, o mapeamento funcional pode ser descrito por:

$$\mu_A(x) \in [0,1] \quad (7.2)$$

Na equação 7.2, o termo $\mu_A(x)$ representa o grau de pertencimento de um determinado elemento x em um conjunto *fuzzy* A . Então, se $\mu_A(x) = 0$, tem-se que x não tem nenhuma pertinência, porém, se $\mu_A(x) = 1$, o elemento em questão tem total pertinência no conjunto A . Além disso, qualquer valor entre 0 e 1 indica uma pertinência intermediária de x em A .

Esses conjuntos capazes de determinar infinitos graus de pertinência são denominados de conjuntos *fuzzy* (Ross, 1995, Zadeh, 1995).

A partir desses conceitos, pode-se imaginar uma situação hipotética que uma pessoa possa ser considerada alta se for maior ou igual a 1,80 metros de altura. Partindo da lógica binária, tem-se que:

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < 1,80m \\ 1, & \text{se } x \geq 1,80m \end{cases} \quad (7.3)$$

A representação desta função de pertinência é dada pela figura 7.1:

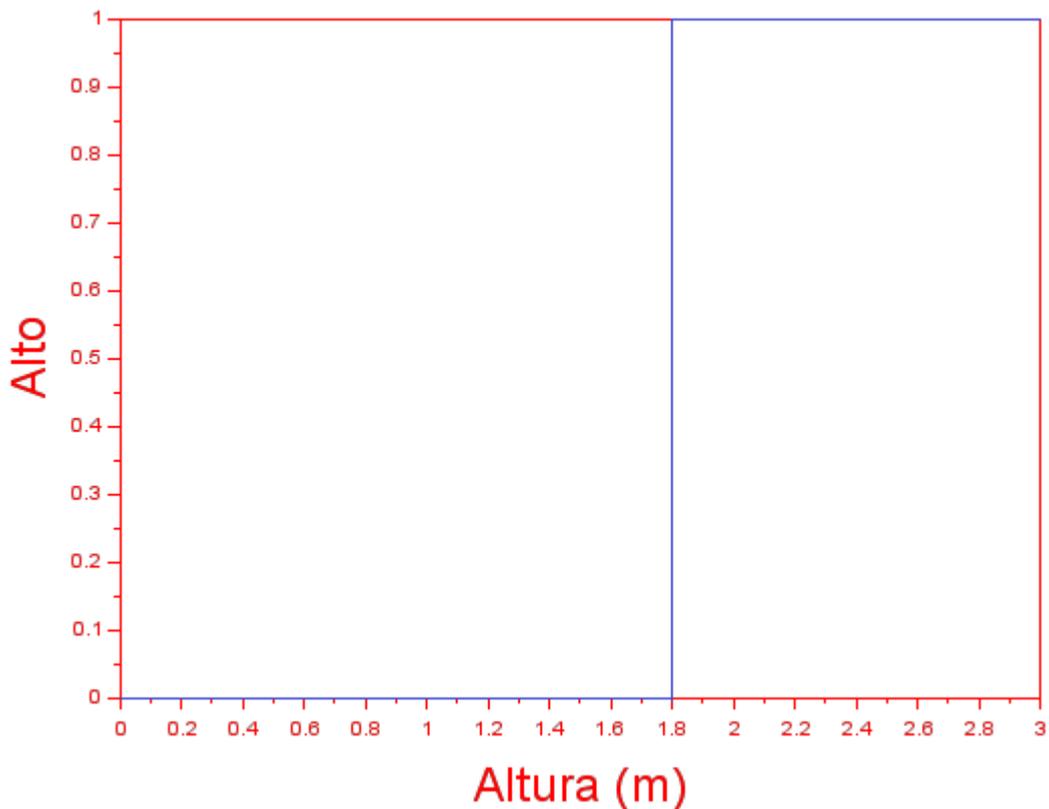


Figura 7.1: Definição de um conjunto de pessoas altas partindo de um conjunto *crisp*. Fonte: O autor.

Conforme a figura acima, caso uma pessoa tenha 1,79 metros, por mais que esteja próxima a 1,80 metros, não será considerada como alta. Isso não é viável em um sistema de controle que lide com erros, pois se um medidor de altura tiver um erro superior a 0,01 metros pode gerar erros e gerar saídas indesejadas.

Para o mesmo problema, pode-se definir um conjunto *fuzzy* que tenha como parâmetros as alturas de 1,80 metros como 100% alta e 1,50 metros como 0% alta. Logo, pode-se desenvolver uma função linear entre esses dois pontos gerando o grau de pertinência de qualquer altura nesse universo. Deve-se levar em conta que existem outros métodos para gerar este conjunto *fuzzy*, que serão vistos nas próximas seções.

Na figura 7.2, mostra-se o gráfico de um conjunto de pessoas altas partindo de 1,50 m, com pessoas não altas, passando por valores intermediários de pessoas altas e chegando a 1,80 m como pessoas 100 % altas. A função de pertinência usada neste exemplo é do tipo linear. Contudo, vale salientar que existem outros tipos de funções de pertinências, que, dependendo do sistema em que se esteja trabalhando, são mais indicadas.

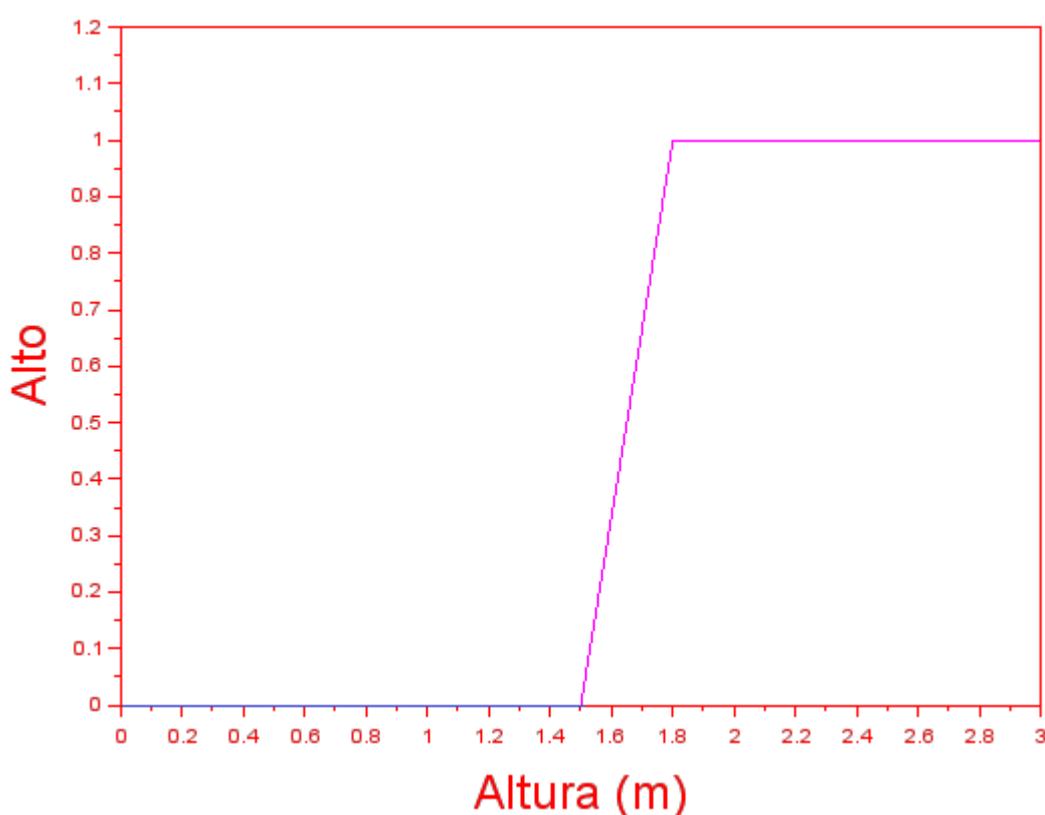


Figura 7.2: Definição de um conjunto de pessoas altas partindo de um conjunto fuzzy. Fonte: O autor.

Portanto, caso um indivíduo tenha 1,65 metros, este será dado como 50% alto, ou seja: $\mu_A(x) = 0,5$. Utilizando o exemplo do conjunto binário, tem-se que para a altura de 1,79 metro: $\mu_A(x) = 0,97$. Logo, conclui-se a importância da lógica *fuzzy* em sistemas de controle que lidam com incertezas. Jantzen (2007) cita que o controle *fuzzy* pode ser considerado como “um controle com regras” capaz de incluir regras empíricas, além de ser aplicável em plantas controladas por operadores.

7.3 Função de pertinência

Conforme Ross (1995), uma função de pertinência pode ser descrita por:

$$\mu_A(x) \rightarrow [0,1], x \in X \quad (7.4)$$

Em que x é um objeto ou uma propriedade em questão, X é o universo utilizado e A é o conjunto de x elementos que é um subconjunto de X .

7.3.1 Função linear

A função linear é a mais simples entre as funções de pertinência utilizáveis em modelos *fuzzy*. Utilizam-se apenas dois parâmetros: a e b . Portanto, a função pode partir de um valor máximo em a e decrescer até b ou ainda começar de um valor mínimo em a e crescer até um valor máximo em b . As duas funções de pertinência são mostradas nas equações 7.5 e 7.6, enquanto as curvas destas são mostradas na figura 7.3.

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (7.5)$$

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 1, & \text{se } x < a \\ \frac{b-x}{b-a}, & \text{se } a \leq x \leq b \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (7.6)$$

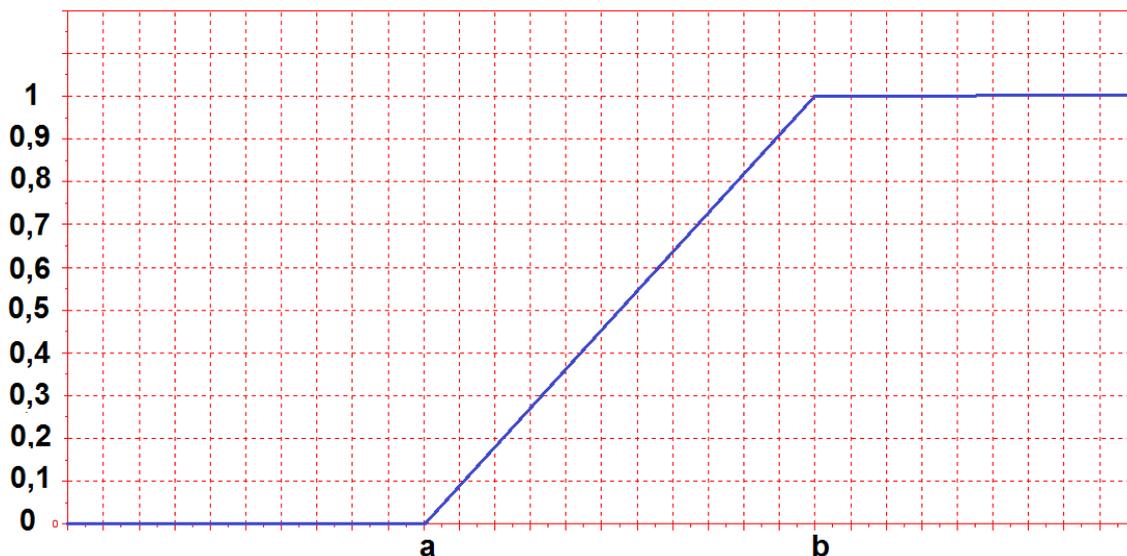


Figura 7.3: Exemplo de uma função de pertinência linear crescente.

Fonte: O autor.

7.3.2 Função Triangular

Para esta função, a formulação da função de pertinência para o elemento x é dada por meio de três parâmetros: a , b , c . Assim, a função de pertinência cresce entre os valores de a e b , atingindo o valor máximo de 1, e decresce entre b e c . Logo, descreve-se esta função por meio da equação 7.7:

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{se } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases} \quad (7.7)$$

Na figura 7.4, exibe-se a curva formada pela função triangular

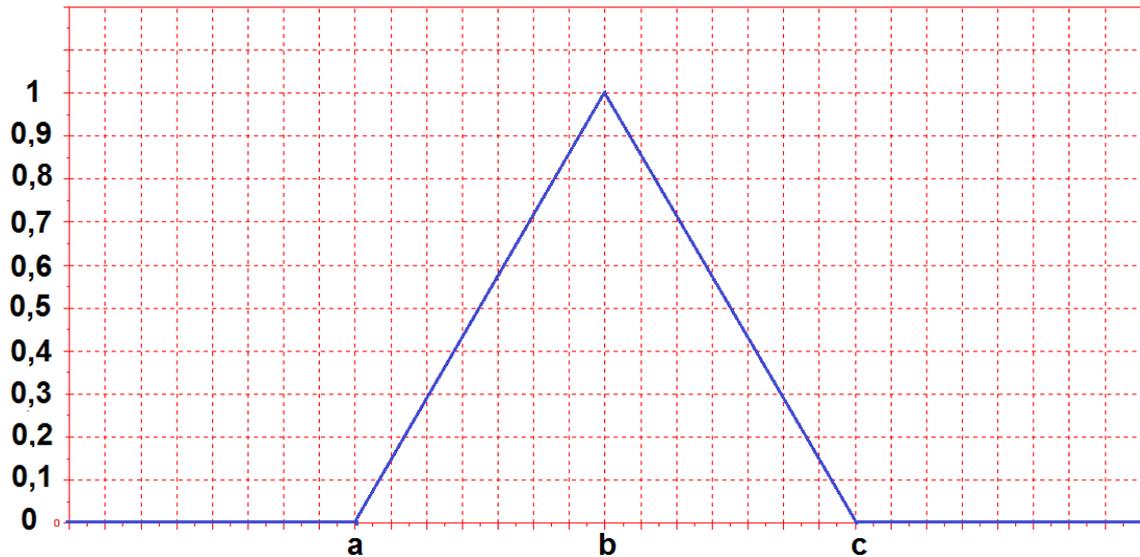


Figura 7.4: Exemplo de uma função de pertinência triangular. Fonte: O autor.

7.3.3 Função Trapezoidal

Neste caso, tem-se o uso dos parâmetros a , b , c e d . A diferença entre esta função e a função triangular é que nesta o valor máximo da função de pertinência é mantido entre os termos b e c . O comportamento desta função é exibido na figura 7.5.

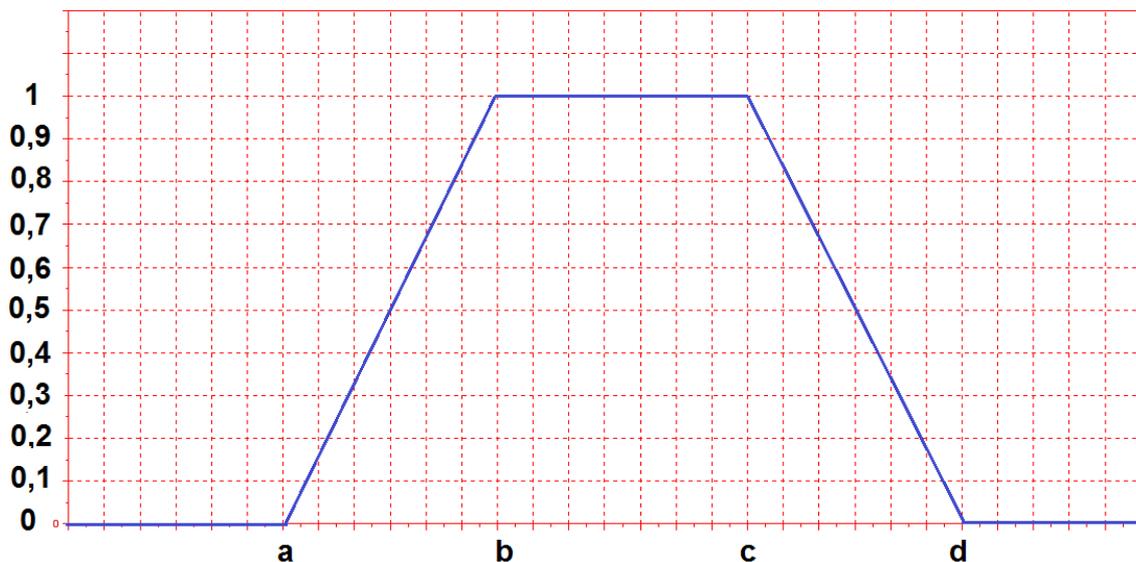


Figura 7.5: Exemplo de uma função de pertinência trapezoidal. Fonte: O autor.

A equação desta função é descrita por:

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a \leq x < b \\ 1, & \text{se } b \leq x < c \\ \frac{c-x}{c-d}, & \text{se } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{se } x > d \end{cases} \quad (7.8)$$

7.3.4 Função Curva Z

A função de curva Z utiliza os parâmetros a , b e c . O equacionamento é dado pela equação 7.9 e a curva é exibida na figura 7.6:

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 1, & \text{se } x < a \\ 1 - 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & \text{se } a \leq x < \frac{a+b}{2} \\ 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & \text{se } \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (7.9)$$

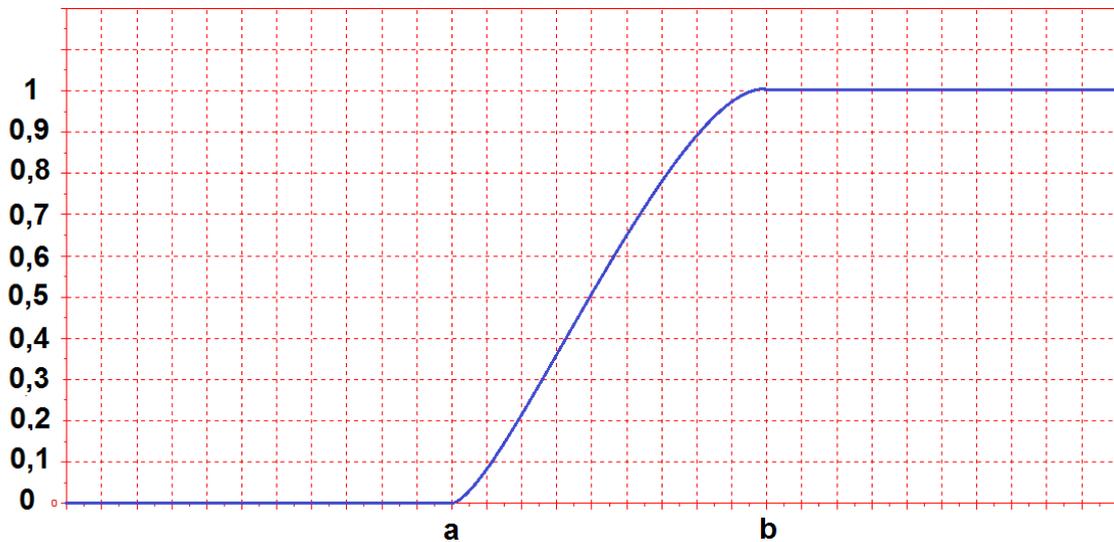


Figura 7.6: Exemplo de uma função de pertinência curva Z. Fonte: O autor.

7.3.5 Função Sigmoide

Partindo dos parâmetros a e b , pode-se equacionar a função sigmoide de duas formas, uma é a função sigmoide crescente e outra é a função sigmoide decrescente, mostradas nas equações 7.10 e 7.11 e exibidas na figura 7.7:

$$f(x, a, b) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}} \quad (7.10)$$

$$f(x, a, b) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}} \quad (7.11)$$

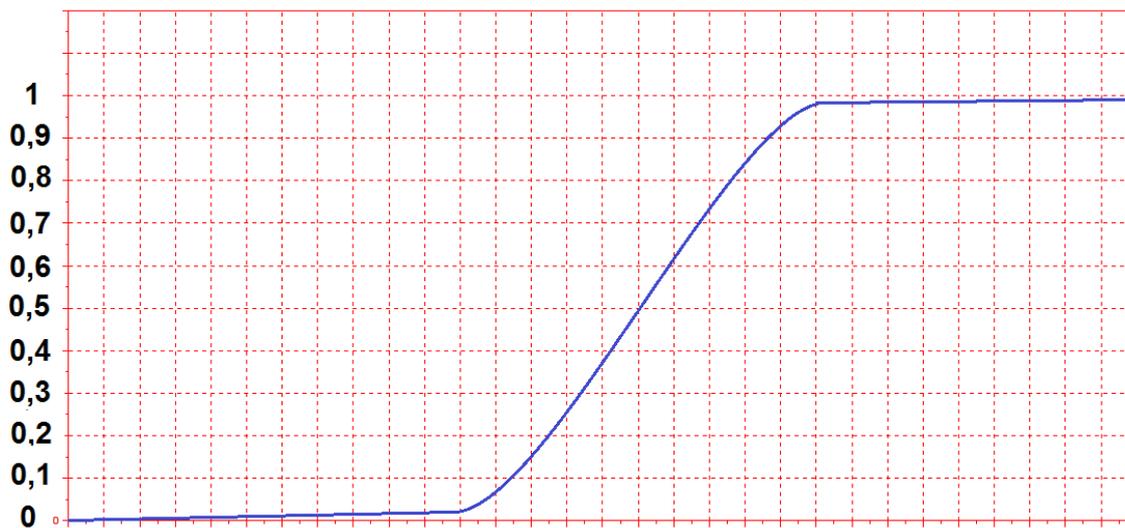


Figura 7.7: Exemplo de uma função de pertinência Sigmoide crescente.
Fonte: O autor.

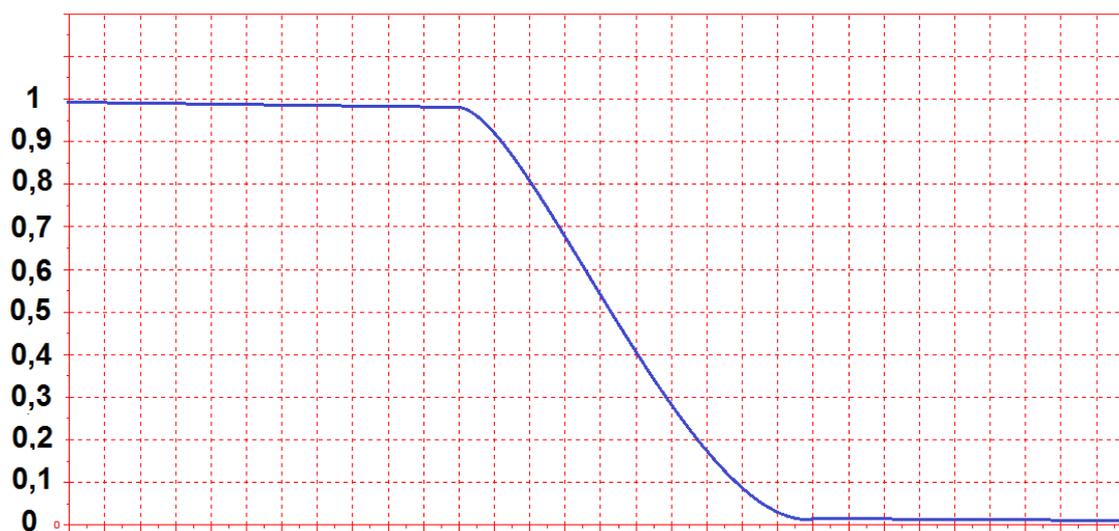


Figura 7.8: Exemplo de uma função de pertinência Sigmoide decrescente.
Fonte: O autor.

7.3.6 Função Sino-Gaussiana

A função de pertinência Sino-Gaussiana é demonstrada pela equação 7.12 e é mostrada na figura 7.9:

$$f(x, \sigma, a) = \frac{1}{1 + e^{\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}} \quad (7.12)$$

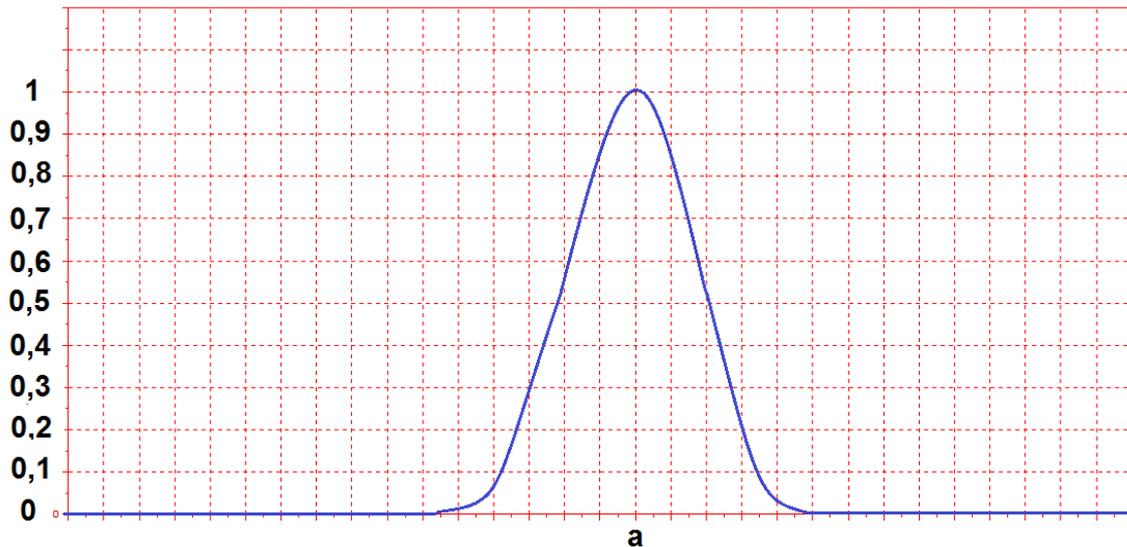


Figura 7.9: Exemplo de uma função de pertinência Sino-Gaussiana.
Fonte: O autor.

De acordo com Neto (2006), pode-se utilizar as equações explicadas nesta subseção conforme a tabela 7.1:

Tabela 7.1 Comparação das aplicações das funções de pertinência.
Fonte: Neto (2006)

Função de Pertinência	Aplicação
Linear	Aproximação de conceitos não bem compreendidos
Triangular	Grande maioria, podendo-se citar: modelagem dinâmica, problema de filas, qualificadores de frequência
Trapezoidal	Grande maioria, podendo-se citar: modelagem dinâmica, problema de filas, qualificadores de frequência
Sigmoide	Pouco uso, aplicável em qualificadores de quantidade
Curva Z	Uso corrente em engenharia de processos
Sino-Gaussiana	Uso corrente

7.4 Operações em conjuntos fuzzy

Realizam-se operações em conjuntos *fuzzy* visando compará-los por meio de funções de: igualdade, inclusão, união, interseção e complemento. Essas operações serão explicadas nas subseções 7.4.1 a 7.4.5, tendo-se em mente dois conjuntos *A* e *B* definidos em um mesmo universo *U* (Pedrycz e Gomide, 2007), (Jantzen, 2007). Nas figuras 7.10 a

7.14 são descritas as operações de igualdade, inclusão, união, intersecção e complemento segundo os diagramas de Venn e *fuzzy*.

7.4.1 Igualdade

Dois conjuntos *fuzzy* são iguais se possuem a mesma função de pertinência, desta forma, para todo x , tem-se que:

$$A = B \equiv \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (7.13)$$

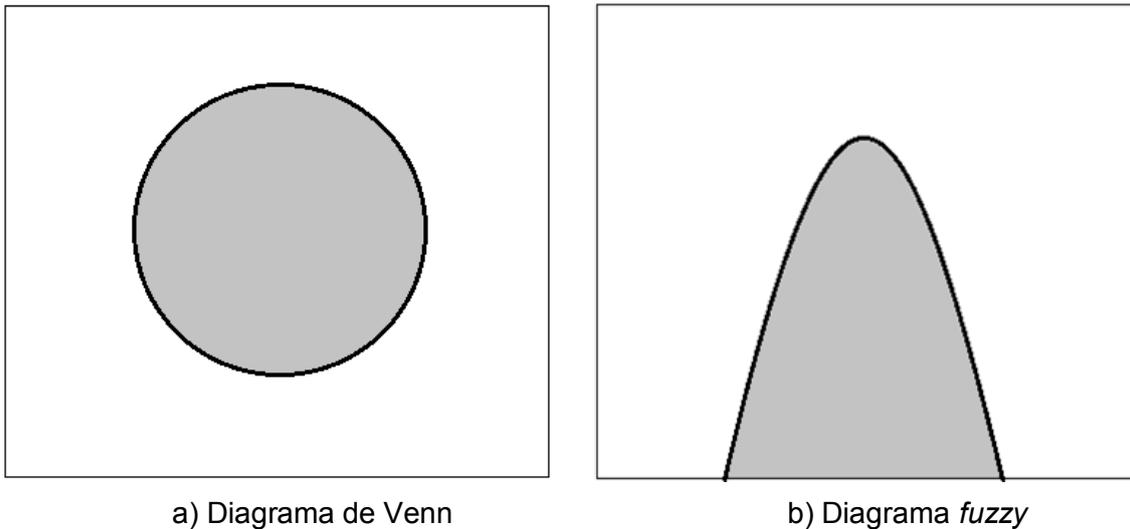


Figura 7.10: Igualdade de conjuntos *fuzzy*. Fonte: O autor.

7.4.2 Inclusão

Um conjunto A está incluído em (ou é subconjunto de) um conjunto B se a função de pertinência de A é menor ou igual a de B , portanto:

$$A \subseteq B \equiv \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (7.14)$$

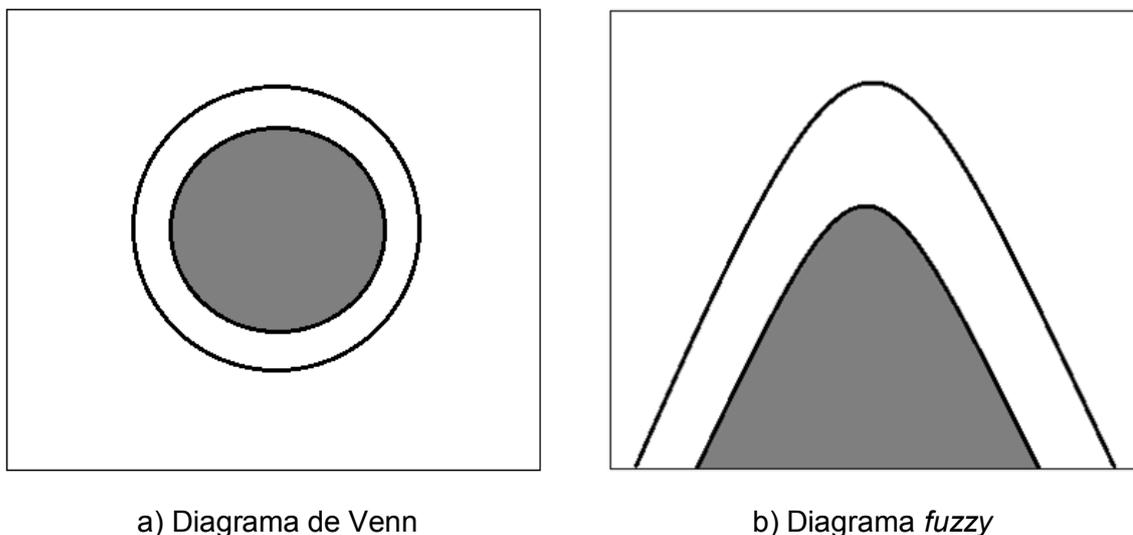
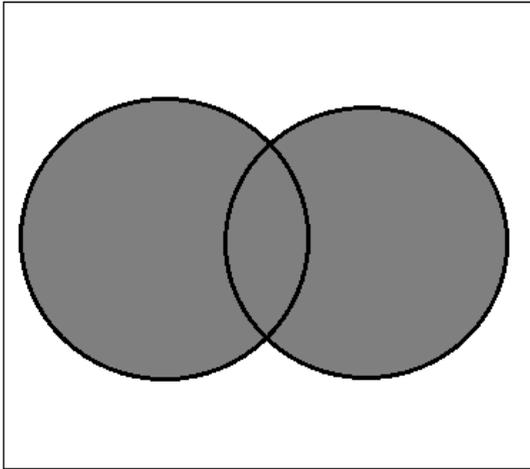


Figura 7.11: Relação de subconjuntos em conjuntos *fuzzy*. Fonte: O autor.

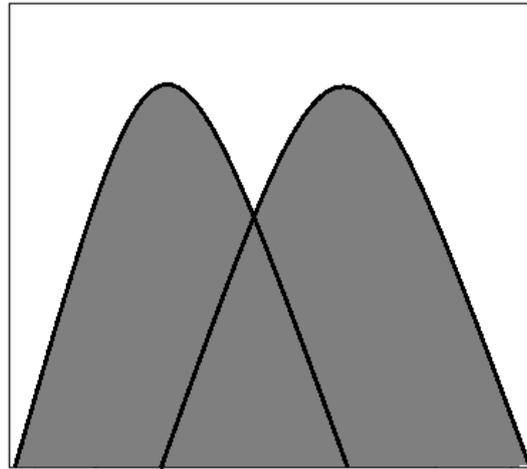
7.4.3 União

A união de um conjunto A com um conjunto B é determinada por;

$$A \cup B \equiv \{(x, \mu_{A \cup B}(x)) \mid x \in U \text{ e } \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))\} \quad (7.15)$$



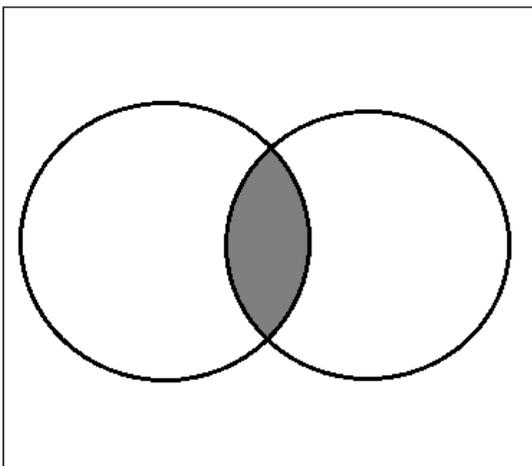
a) Diagrama de Venn

b) Diagrama *fuzzy*Figura 7.12: União de conjuntos *fuzzy*. Fonte: O autor.

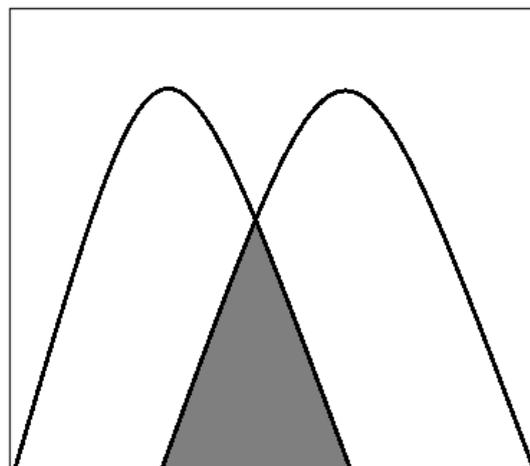
7.4.4 Intersecção

A intersecção de um conjunto A com um conjunto B é determinada por:

$$A \cap B \equiv \{(x, \mu_{A \cap B}(x)) \mid x \in U \text{ e } \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))\} \quad (7.16)$$



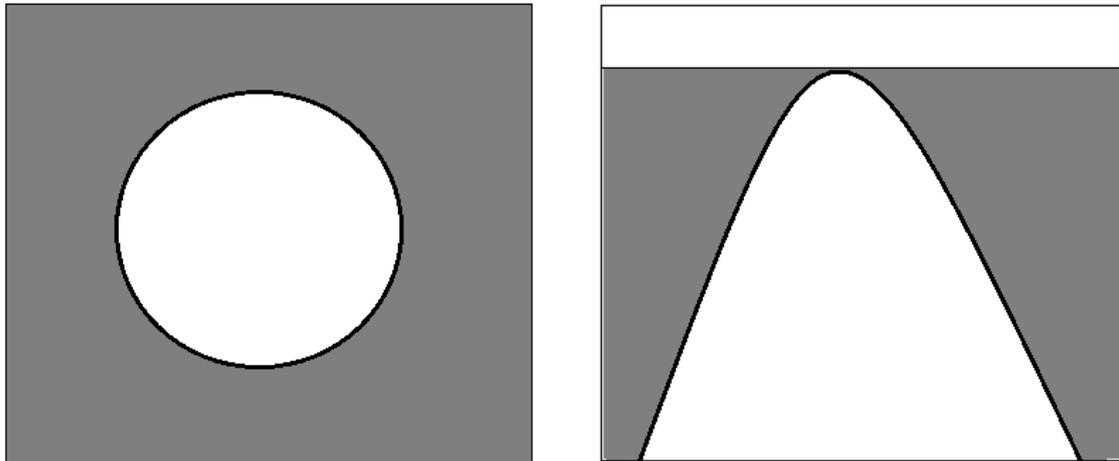
a) Diagrama de Venn

b) Diagrama *fuzzy*Figura 7.13: Intersecção de conjuntos *fuzzy*. Fonte: O autor.

7.4.5 Complemento

O complemento de um conjunto A em um universo U é determinado por:

$$\bar{A} \equiv \{(x, \mu_{\bar{A}}(x)) \mid x \in U \text{ e } \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)\} \quad (7.17)$$



a) Diagrama de Venn

b) Diagrama *fuzzy*

Figura 7.14: Complemento de conjuntos *fuzzy*. Fonte: O autor.

7.5 Componentes de um controlador *fuzzy*

Conforme Mozelli (2003), os sistemas de inferência são ferramentas computacionais utilizadas no processamento de dados por meio de mecanismos de inferência. Desta forma, unem-se conceitos de lógica *fuzzy*, variáveis linguísticas e raciocínio aproximado.

Para implementar a lógica *fuzzy* em processos de aplicação real, tem-se que seguir as seguintes etapas (Bai *et al.*, 2006):

1. “Fuzzyficação”: Conversão de dados clássicos, ou *crisp*, fornecidos pelo sistema em dados *fuzzy* ou mesmo em funções de pertinência;
2. Processo de inferência *fuzzy*: Cominação das funções de pertinência com as regras de controle que deriva na saída *fuzzy*;
3. “Defuzzyficação”: Uso de diferentes métodos para calcular cada uma das saídas associadas a cada regra e gerar o resultado numérico discreto de saída do controlador.

De acordo com Jantzen (2007), um controlador *fuzzy* pode ser definido conforme a figura 7.15, sendo constituído pelos blocos de: “fuzzyficação”, regras, máquina de inferência e “defuzzyficação”. Na entrada do controlador existe o bloco de pré-processamento, enquanto que na saída daquele tem-se o bloco de Pós-processamento. O detalhamento desses blocos será feito nas subseções de 7.5.1 a 7.5.4.

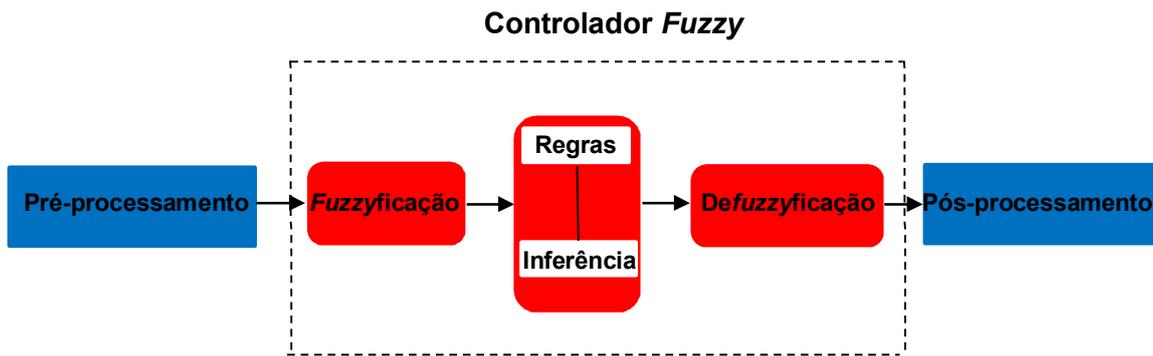


Figura 7.15: Diagrama de blocos de um controlador *fuzzy*. Fonte: Jantzen, 2007.

7.5.1 Bloco de pré-processamento

Este bloco é necessário para realizar a conversão de um estado para um sinal que será interpretado pelo controlador. Mozelli (2003) aborda que as entradas de sistemas *fuzzy* geralmente são conjuntos *crisp*, enquanto Jantzen (2007) cita que o bloco de pré-processamento pode ser representado por:

- Quantização na conexão com amostragem ou arredondamento para números inteiros;
- Normalização ou interpolação em uma escala padrão;
- Filtragem visando remover ruídos;
- Realização de médias para obter a tendência a curto prazo e a longo prazo.

7.5.2 Bloco de “fuzzyficação”

A “fuzzyficação” é o primeiro passo para aplicar o sistema de inferência *fuzzy*. Considerando que a maioria das variáveis existentes no mundo real são *crisp*, deve-se realizar a conversão dessas em variáveis *fuzzy* para que, desta forma, aplique-se as regras e a inferência *fuzzy*. Geralmente, este processo envolve duas etapas (Bai *et al.*, 2006):

- Gerar a função de pertinência que para as variáveis de entrada e saída;
- Representar as variáveis de entrada e saída com variáveis linguísticas.

Ou seja, o bloco de “fuzzyficação” é responsável por gerar os graus de pertinência de uma determinada entrada no sistema, partindo das funções de pertinência vistas na subseção 7.3, de forma a transformar uma determinada quantidade *crisp* em *Fuzzy* (Ross, 2010).

Utilizando o *toolbox fuzzy* do Matlab®, visto na figura 7.16, podem-se exemplificar as funções de pertinência para o controle de rotação de um propulsor em que as entradas são o erro da velocidade e o erro da aceleração de rotação. A saída é a tensão no motor.

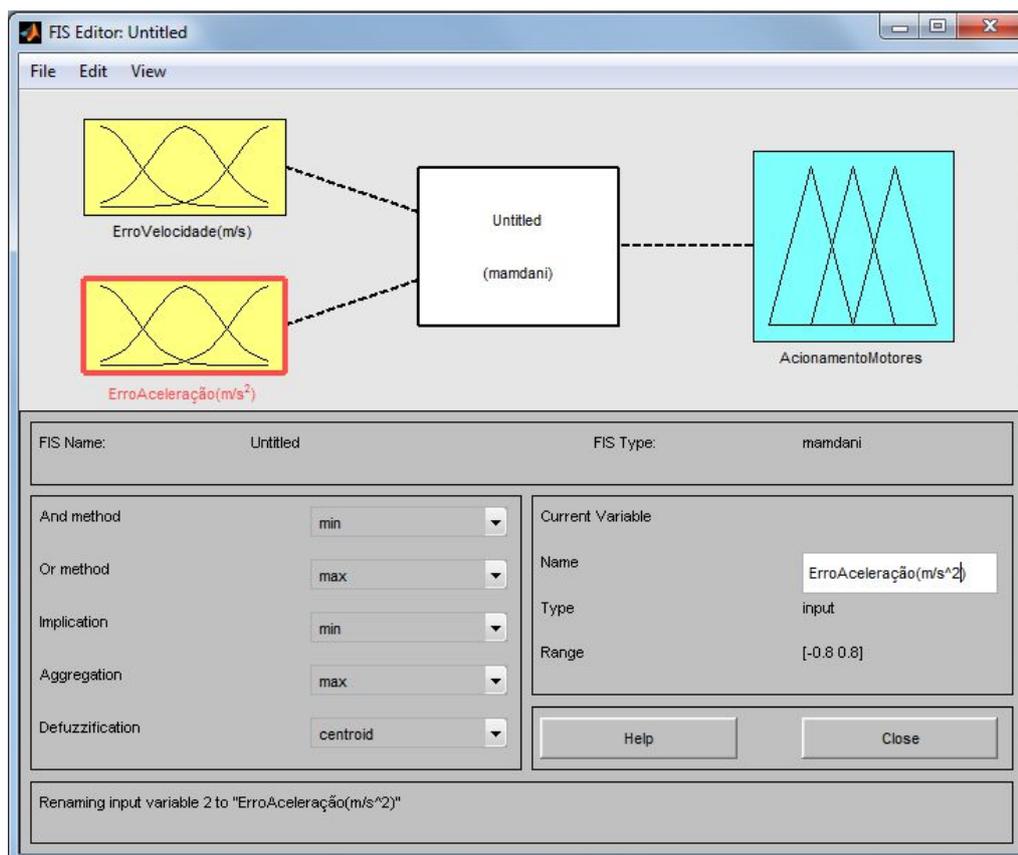


Figura 7.16 Exemplo de aplicação do toolbox *fuzzy* do Matlab. Fonte: O autor.

Conforme Jantzen (2006), a utilização do erro e da velocidade do erro torna este exemplo em uma versão *fuzzy* do controlador Proporcional e Derivativo (PD).

Neste caso, definem-se as funções de pertinência para as variáveis: (i) erro de velocidade da rotação do propulsor e; (ii) erro da aceleração do propulsor. Conforme as figuras 7.17 e 7.18 aplicou-se a função trapezoidal para a definição das variáveis: erro negativo e erro positivo. Já função de pertinência triangular foi utilizada para representar o erro nulo.

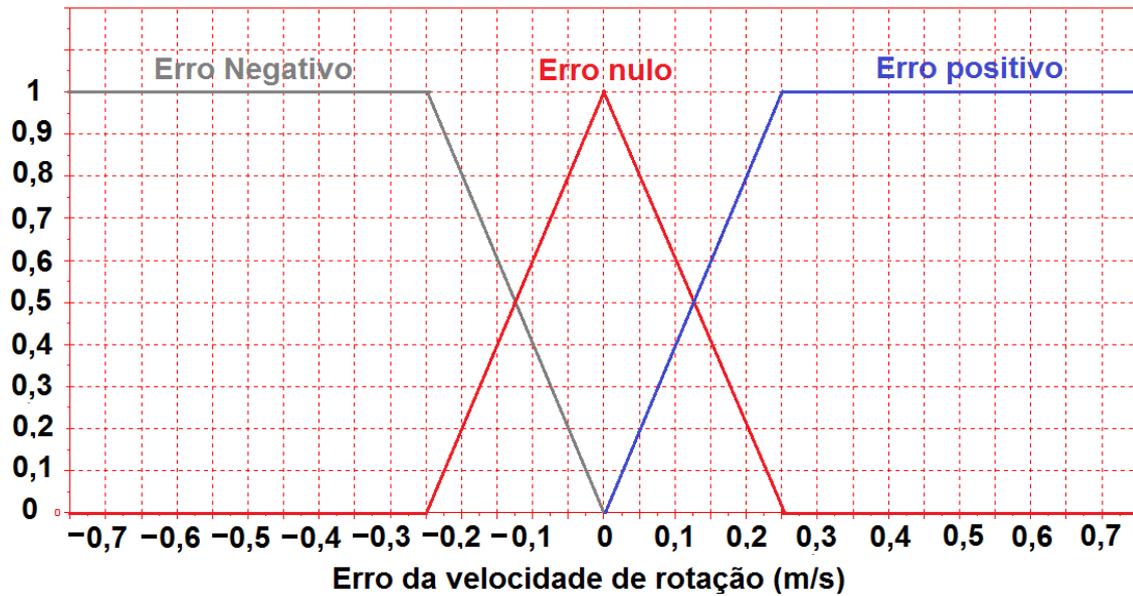


Figura 7.17: Função de pertinência para o erro da velocidade de rotação.
Fonte: O autor.

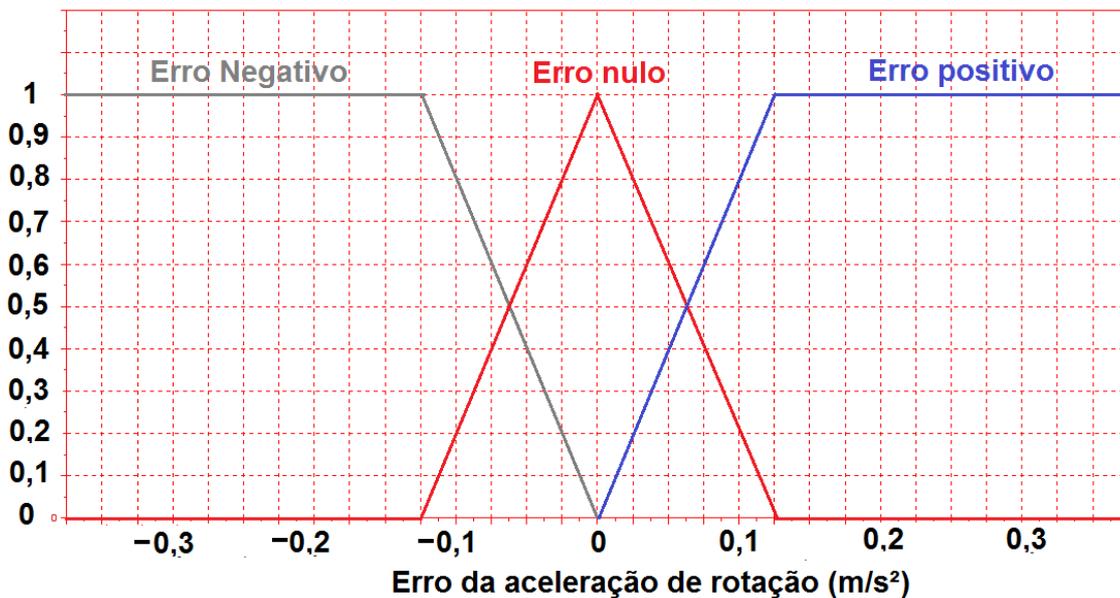


Figura 7.18: Função de pertinência para o erro da aceleração de rotação.
Fonte: O autor.

7.5.3 Bloco baseado em regras

Regras são utilizadas para definir a tomada de ações em um determinado sistema, que pode ser de uma entrada e uma saída ou de múltiplas entradas e múltiplas saídas, partindo de determinadas premissas e conclusões (Jantzen, 2007). Pode-se demonstrar o funcionamento deste bloco utilizando o controle de rotação de um propulsor, para gerar as seguintes regras:

1. SE o erro da velocidade é positivo e o erro da aceleração é positivo, ENTÃO a tensão é grande e negativa;
2. SE o erro da velocidade é nulo e o erro da aceleração é positivo, ENTÃO a tensão é média e negativa;
3. SE o erro da velocidade é negativo e o erro da aceleração é positivo, ENTÃO a tensão é nula;
4. SE o erro da velocidade é positivo e o erro da aceleração é nulo, ENTÃO a tensão é média e negativa;
5. SE o erro da velocidade é nulo e o erro da aceleração é nulo, ENTÃO a tensão é nula;
6. SE o erro da velocidade é negativo e o erro da aceleração é nulo, ENTÃO a tensão é média e positiva;
7. SE o erro da velocidade é positivo e o erro da aceleração é negativo, ENTÃO a tensão é nula;
8. SE o erro da velocidade é nulo e o erro da aceleração é negativo, ENTÃO a tensão é média e positiva;
9. SE o erro da velocidade é negativo e o erro da aceleração é negativo, ENTÃO a tensão é grande e positiva.

Pode-se compactar este conjunto de regras utilizando o formato tabular (Jantzen, 2007):

Erro da velocidade

	N	Zero	P
N	PG	PM	Zero
Zero	PM	Zero	NM
P	Zero	NM	NG

Figura 7.19: Formato tabular da representação do conjunto de regras *fuzzy*.

Fonte: O autor.

Levando-se em consideração que os motores operam no máximo em ± 24 V, pode-se mostrar graficamente a saída das regras conforme a figura 7.20:

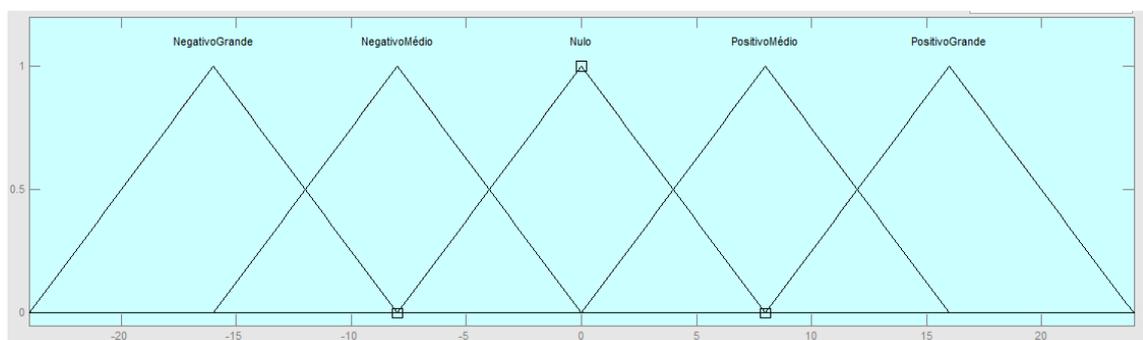


Figura 7.20: Conjunto de saídas. Fonte: O autor.

Além disso, pode-se visualizar a superfície de respostas para o conjunto de regras *fuzzy* conforme a figura 7.21:

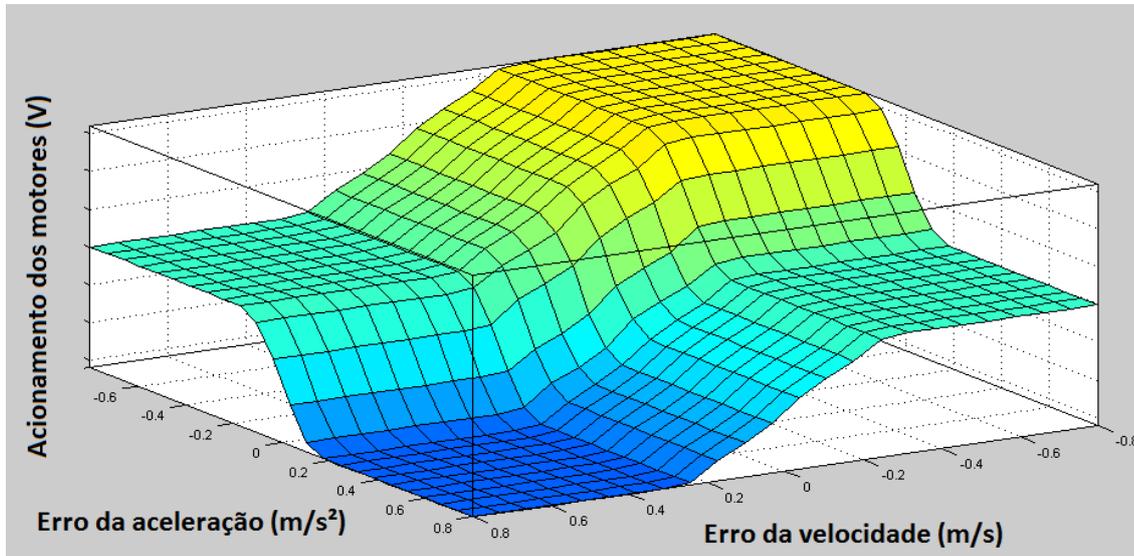


Figura 7.21: Superfície de saídas gerada a partir do conjunto de regras.
Fonte: O autor.

7.5.4 Máquina de inferência

Bai *et al.* (2006) citam que a máquina de inferência é a combinação das funções de pertinência das entradas e saídas e das regras estabelecidas no controlador que geram uma saída linguística. Cardozo (2013) cita que existem três etapas na máquina de inferência *fuzzy*:

1. Identificar os valores correspondentes aos graus de pertinência;
2. Determinar a força das conclusões de cada regra acionada;
3. Definir a saída *fuzzy*.

Na figura 7.21 utilizou-se o *toolbox fuzzy* do Matlab® para realizar a construção gráfica da inferência, em que cada linha representa uma regra do conjunto *fuzzy*. Ou seja, para cada regra a máquina de inferência intercepta com uma linha e verifica a pertinência.

De acordo com Jantzen (2007), o parâmetro α_k representa o grau de pertinência de uma premissa de uma determinada regra k , a qual determinará dois valores de pertinência *fuzzy*: (i) erro da velocidade ($\mu_{V,k}$) e; (ii) erro da aceleração ($\mu_{A,k}$). A agregação de ambos é feita pela operação de intersecção (\wedge) vista na equação 7.18:

$$\alpha_k = \mu_{V,k} \wedge \mu_{A,k} \quad (7.18)$$

Todas as conclusões são acumuladas por meio da operação de união gerando o conjunto *fuzzy* μ_C . Exemplificando, para os valores de erro da velocidade = 0,07m/s e erro da aceleração = -0,1 m/s², é representado no último bloco da figura 7.22.

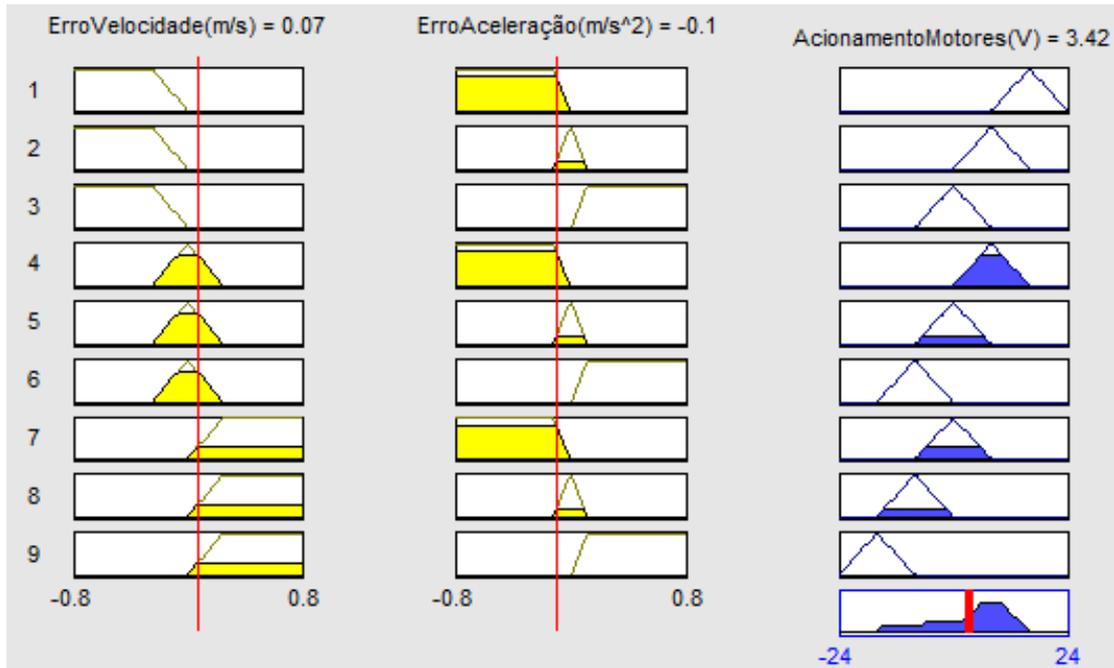


Figura 7.22: Construção gráfica do sinal de controle *fuzzy*. Fonte: O autor.

7.5.5 Bloco de "Defuzzyficação"

O bloco de "defuzzyficação" converte a saída da máquina de inferência *fuzzy* em valores *crisp*. O conjunto *fuzzy* resultante μ_c deve ser convertido para um único número de forma a gerar um sinal de controle para um sistema (Jantzen, 2007). De acordo com Bai *et al.* (2006), existem diversos métodos de *defuzzyficação*, entre eles os mais utilizados são apresentados nas próximas seções:

7.5.5.1 Método da média do máximo

O método de "defuzzyficação" da média do máximo armazena a média das conclusões *fuzzy* ou saídas que possuem os maiores valores. Logo, a saída u_{MOM} é dita por:

$$u_{MOM} = \frac{\sum_{i \in T} x_i}{|T|}, \quad T = \{i \mid \mu_c(x_i) = \mu_{max}\} \quad (7.19)$$

onde T é o conjunto *crisp* de índices i onde $\mu_c(x_i)$ atinge o valor máximo μ_{max} e $|T|$ é o número de membros (Jantzen, 2006).

7.5.5.2 Método do centro de gravidade

De acordo com Bai *et al.* (2006), este é o método de "defuzzyficação" mais usado em controladores *fuzzy*. Para este método, calcula-se a média ponderada das funções de pertinência ou mesmo o centro de gravidade da área delimitada pela função de pertinência (Jantzen, 2007). A variável de controle *crisp* (u_{COGS}) é a abscissa do centro de gravidade do conjunto *fuzzy*, que é calculada pela equação 7.20:

$$u_{COGS} = \frac{\sum_i \mu_c(x_i)x_i}{\sum_i \mu_c(x_i)} \quad (7.20)$$

onde x_i é o ponto no universo U de uma conclusão ($i=1,2,\dots$) e $\mu_c(x_i)$ é o pertencimento do conjunto conclusão resultante. Jantzen (2007) cita que a expressão na equação acima representa a média ponderada dos elementos do conjunto.

Este processo se assemelha ao cálculo do centro de gravidade visto na física (Hallyday, 2006). Este método foi utilizado no exemplo de controle de tensão nos propulsores e gerou a saída $u = 3,42$ V na figura 7.21.

7.5.5.3 Método da altura

Este método de “defuzzyficação” é válido apenas para o caso em que a função de pertinência de saída é um resultado funções simétricas. Este método pode ser dividido em duas etapas. Em primeiro lugar, a função de pertinência constante F_i pode ser convertida em um contínuo $x = f_i$ onde f_i é o centro de gravidade de F_i . Em seguida, o método do centro de gravidade é aplicado às regras do conjunto *fuzzy*, cuja saída é determinada por:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^M w_i f_i}{\sum_{i=1}^M w_i} \quad (7.21)$$

onde w_i é o grau em que a i -ésima regra corresponde aos dados de entrada. A vantagem deste método é a sua simplicidade.

7.5.6 Bloco de pós-processamento

O valor do controle inferido é definido em um universo padrão e deve estar escalado em unidades físicas, que podem ser: Volts, metros, kg, °C etc.

7.6 Controladores baseados em regras

Diferentes controladores *fuzzy* foram desenvolvidos após os primeiros trabalhos de Zadeh (1973), podendo-se citar os controladores de Mandani (1974) e de Takagi-Sugeno (1983). Jantzen (2007) cita que ambos utilizam os mesmos esquemas de inferência, entretanto diferem no método de ativação e nas funções de pertinência das conclusões das regras.

7.6.1 Controlador de Mandani

Os controladores deste tipo possuem como base o trabalho de Mandani (1974) que, motivado pelo trabalho de Zadeh (1973), desenvolveu uma aplicação para o controle da pressão da caldeira de uma máquina a vapor, em torno de um ponto de equilíbrio, utilizando a lógica *fuzzy* para interpretar as regras que expressam qualitativamente a estratégia de controle.

Este método aplica um conjunto de regras de SE A ENTÃO B em que tanto o antecedente quanto o conseqüente são valores de variáveis linguísticas expressos por meio de conjuntos *fuzzy* (Andrade e Jacques, 2014).

A ação do controlador *fuzzy* é definida pelo processo de defuzzificação da agregação das regras que compõem o algoritmo, mediante o uso do conectivo “também”, o qual pode ser implementado por diferentes operadores (Mandani, 1974) (Andrade e Jacques, 2014).

Cardozo (2013) cita que uma desvantagem de modelos linguísticos, como o de Mandani, é a falta de conhecimento objetivo do sistema caso tal conhecimento não possa ser expresso ou incorporado na estrutura do conjunto *fuzzy*.

7.6.2 Controlador de Takagi-Sugeno

Os sistemas *fuzzy* Takagi-Sugeno, também denominados Takagi-Sugeno-Kang (Mozzeli, 2003), são sistemas de inferência capazes de descrever um determinado sistema dinâmico não-linear utilizando sistemas dinâmicos lineares. Mozzeli (2003), cita que esses sistemas são interpolados de forma suave e localmente válidos, além de possuírem a vantagem de diminuir o número de regras SE-ENTÃO, pois tratam-se de sistemas dinâmicos.

Conforme Zeng *et al.* (2000), sistemas *fuzzy* Takagi-Sugeno possuem a capacidade de aproximação universal, ou seja, podem aproximar quaisquer funções em um domínio compacto (Mozzeli, 2003).

No artigo de Takagi-Sugeno (1983) os autores citam duas aplicações desta técnica em sistemas industriais: (i) produção de ferro e; (ii) tratamento d'água. A ideia deste método é utilizar combinações das entradas, mediante funções lineares ou complexas (Jantzen, 2007).

Um controlador de Takagi-Sugeno opera segundo o seguinte tipo de regra:

SE a entrada 1 equivale a x e a entrada 2 equivale a y , ENTÃO a saída determinada por $z = ax + by + c$.

Caso o controlador seja de ordem zero, tem-se que a saída z é constante, logo $a = b = 0$. Levando-se em conta um determinado conjunto de regras, tem-se N diferentes saídas z_i que nivelam a saída por meio dos pesos atribuídos a cada uma. Por fim, a saída deste sistema é dada pela equação 7.22:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (7.22)$$

7.7 Resumo do capítulo

Neste capítulo, revisaram-se os conceitos de lógica *fuzzy* necessários para a realização deste trabalho. Foram mostradas diferentes funções de pertinência, assim como suas possíveis aplicações e em seguida, mostrou-se um exemplo aplicando esses conceitos utilizando o *toolbox* do Matlab® junto ao pacote Simulink®. Conforme é mostrado no Capítulo 10, a função de pertinência escolhida para as variáveis linguísticas do CTF Takagi-Sugeno foi a triangular.

Capítulo 8

8. Fundamentos dos Veículos Subaquáticos Autônomos estudados

Neste capítulo serão mostrados os fundamentos dos VSA utilizados do projeto do CTF desenvolvido. Para isso, deve-se realizar a introdução dos veículos subaquáticos Nerov e Biointeractive-1, bem como a suas estruturas de controle e seus parâmetros físicos.

8.1 Veículo Subaquático Biointeractive-1

Após a alarmante publicação na revista Worm *et al.* (2006), que prevê a extinção dos peixes em 2048, a Universidade de Ciência Marinha e Tecnologia de Tóquio começou o desenvolvimento de um projeto de sistemas de aquicultura *Offshore* (fora da costa). Para auxiliar esse projeto, tem-se o desenvolvimento do veículo subaquático autônomo Biointeractive-1 (BA-1), visto na figura 8.1.



Figura 8.1: Veículo Subaquático autônomo Biointeractive-1.
Fonte: Kondo *et al.*, 2010.

Conforme Kondo *et al.* (2010), os VSA utilizados em ambientes oceânicos geralmente possuem o formato de torpedo e apenas um propulsor, que pode ser tanto móvel quanto fixo. Contudo, conforme é exibido na figura 8.2, o veículo BA-1 possui 6 propulsores fixos. Isso garante um melhor controle dos movimentos de avanço, deriva, oscilação, balanço, arfagem e guinada (Kondo *et al.*, 2010).

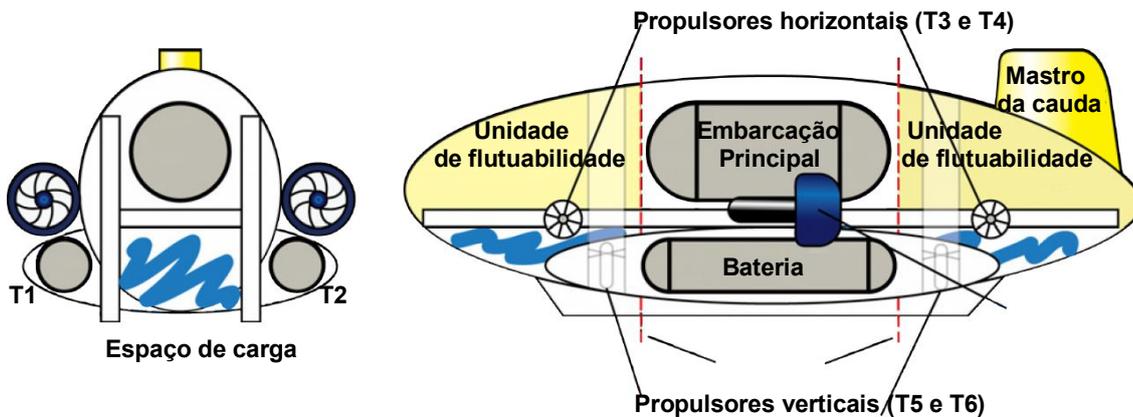


Figura 8.2: Descrição geral do BA-1. Fonte: Kondo *et al.*, 2010.

De acordo com Kondo *et al.* (2010), finalidade do projeto do veículo Bionteractive-1 é permanecer no ambiente de criação de cardumes de peixes e monitorá-los, além de: alimentá-los, guiá-los pelo ambiente de aquicultura e registrar o crescimento deles. Na figura 8.3 mostra-se o conceito do sistema de aquicultura, em que diversos veículos atuam em conjunto. Este veículo possui a capacidade de dar estímulos aos peixes e observar o comportamento causado pelo estímulo, conforme será observado nas próximas subseções.

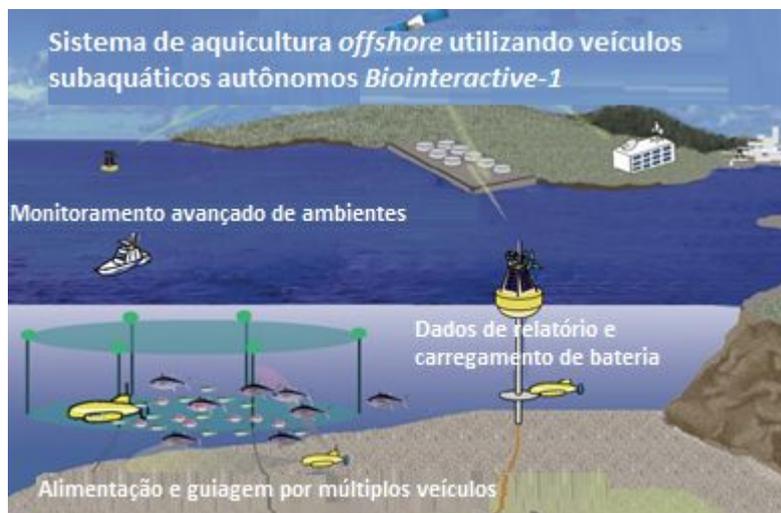


Figura 8.3: Conceito do sistema de aquicultura. Fonte: Kondo *et al.*, 2010.

8.1.1 Sistema de propulsão do Biointeractive-1

Dois propulsores que utilizam motores sem escovas de 2,7 kW são montados ao lado do veículo em paralelo à linha do tronco/coluna (Kondo *et al.*, 2010). Estes são os principais propulsores para controlar movimentos de avanço e guinada. Quatro propulsores DC, sem escovas de 450 W, são montados em túneis dianteiros e em túneis de popa. Dois estão montados na direção lateral, horizontalmente, para controlar os movimentos de deriva e guinada e outros dois estão montados, verticalmente, para controlar os movimentos de oscilação e arfagem (Kondo *et al.*, 2010).

Conforme Cardozo (2013) apud Choi e Kondo (2010), devido às baixas velocidades de trabalho do BA-1 pode-se separar o sistema de propulsão em dois subsistemas: um horizontal (Propulsores T1, T2, T3 e T4) e um vertical (Propulsores T5 e T6). Na figura 8.4a mostra-se o subsistema horizontal, em que os quatro propulsores horizontais (T1, T2, T3 e T4) geram os movimentos avanço, deriva e guinada. Já na figura 8.4b tem-se o subsistema vertical, em que os propulsores verticais (T5 e T6) geram os movimentos de arfagem e oscilação. O movimento de guinada também pode ser executado pela combinação dos propulsores horizontais T1, T2, T3 e T4.

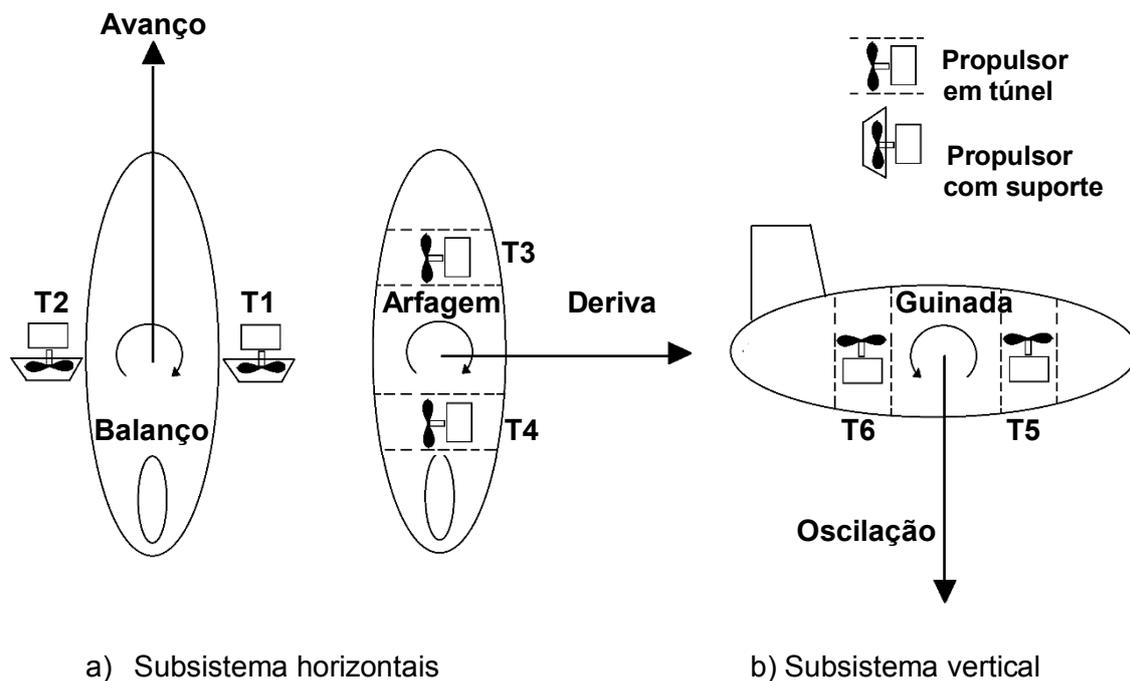


Figura 8.4: Subsistemas da configuração dos propulsores do BA-1.
Fonte: Kondo *et al.*, 2010.

Na tabela 8.1, é mostrada a relação da combinação de propulsores com possíveis movimentos nos planos horizontal e vertical (Cardozo, 2013).

Tabela 8.1 Relação de propulsores com movimentos do veículo.
Fonte: Cardozo, 2013 e Kondo *et al.*, 2010

Combinação de propulsores	Movimento executado
T1 e T2	Avanço
T3 e T4	Deriva
T5 e T6	Oscilação
T5 e T6	Arfagem
T1, T2 T3 e T4	Guinada

Conforme Tavares, 2003 apud Fossen e Balchen 1991, as forças de propulsão podem ser representadas por:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= T_{|n|n}|n_1|n_1 = T_{|n|n}u_1 \\
 T_2 &= -T_{|n|n}|n_2|n_2 = -T_{|n|n}u_2 \\
 T_3 &= T_{|n|n}|n_3|n_3 = T_{|n|n}u_3 \\
 T_4 &= T_{|n|n}|n_4|n_4 = -T_{|n|n}u_4 \\
 T_5 &= T_{|n|n}|n_5|n_5 = T_{|n|n}u_5 \\
 T_6 &= -T_{|n|n}|n_6|n_6 = -T_{|n|n}u_6
 \end{aligned}
 \tag{8.1}$$

Como pode-se observar na equação (8.1), os pares de propulsores 1 e 2, 3 e 4 e 5 e 6 possuem pás com inclinações contrárias, de forma que para produzir forças no mesmo sentido, devem girar em sentidos contrários. Tavares (2003) aborda que essa configuração das hélices evita a geração de movimentos indesejáveis de rotação do veículo, pois as forças de propulsão se somam enquanto os torques se anulam. Considerando a distribuição dos propulsores pode-se descrever a contribuição de força de cada propulsor da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 T_{x1} &= 1, & T_{y1} &= 0, & T_{z1} &= 0 \\
 T_{x2} &= 1, & T_{y2} &= 0, & T_{z2} &= 0 \\
 T_{x3} &= 0, & T_{y3} &= 1, & T_{z3} &= 0 \\
 T_{x4} &= 0, & T_{y4} &= 1, & T_{z4} &= 0 \\
 T_{x5} &= 0, & T_{y5} &= 0, & T_{z5} &= 1 \\
 T_{x6} &= 0, & T_{y6} &= 0, & T_{z6} &= 1
 \end{aligned}
 \tag{8.2}$$

8.1.2 Sistema de sensoriamento do BA-1

O BA-1 possui 4 tipos de sensores: de navegação, de desvio de colisão, monitoramento de “status” e de carga. Os sensores de navegação são:

1. INS (*Inertial Navigation System*): Sensor capaz de realizar a localização do veículo, a orientação e a velocidade por meio de acelerômetros e giroscópios;
2. DVL (*Doppler velocity Log*): Sensor que, por meio do efeito Doppler, auxilia o INS no cálculo da velocidade do veículo;
3. Sensor de profundidade: Mede a profundidade do veículo embaixo d’água;
4. FOG (*Fiber Optic Gyroscopes*): Mede a variação da orientação do veículo;
5. AHRS (*Attitude and Heading Reference System*): Provê a orientação 3D por meio da união dos dados de giroscópios, acelerômetros e sensores magnéticos.

Kondo *et al.* (2010) aborda que o AHRS e o FOG são sensores de navegação redundantes, entretanto, são necessários para aplicar o algoritmo de navegação multissensorial.

8.1.3 Funcionalidades do BA-1

Para realizar as diversas tarefas para o qual foi projetado, o BA-1 conta com diversos sistemas de sensoriamento e atuação, os quais podem ser vistos na figura 8.5.

Primeiramente, espera-se que BA-1 forneça imagens dos peixes enquanto permanece entre eles e sem gerar estresse aos mesmos. Para conseguir realizar essa tarefa satisfatoriamente, o BA-1 conta um conjunto de câmeras e sonares. Além disso, o veículo possui sistemas de monitoramento do meio externo, tais como: termômetros, sensores de oxigênio dissolvido e sonares de varredura lateral. Kondo *et al.* (2010) cita que os sons são úteis para monitorar os comportamentos dos peixes e os materiais do fundo do mar.

Para estimular os cardumes, o veículo conta com sistemas de iluminação, som e alimentação. O sistema de iluminação é do tipo LED a cores (duas unidades de 432 LEDs RGB cada). Cada segmento pode ser controlado individualmente para produzir uma iluminação colorida uniforme ou piscar com movimentos indicativos aos cardumes.

O sistema de som possui um alto-falante subaquático e o sistema de alimentação funciona a partir de uma isca, um sensor de proximidade e uma bomba subaquática. Quando um peixe escolhe a isca amarrada ao veículo, o sensor de proximidade o detecta e ativa a bomba d'água para empurrar a isca. Logo, espera-se que os peixes aprendam a seguir o veículo para obter alimentos.

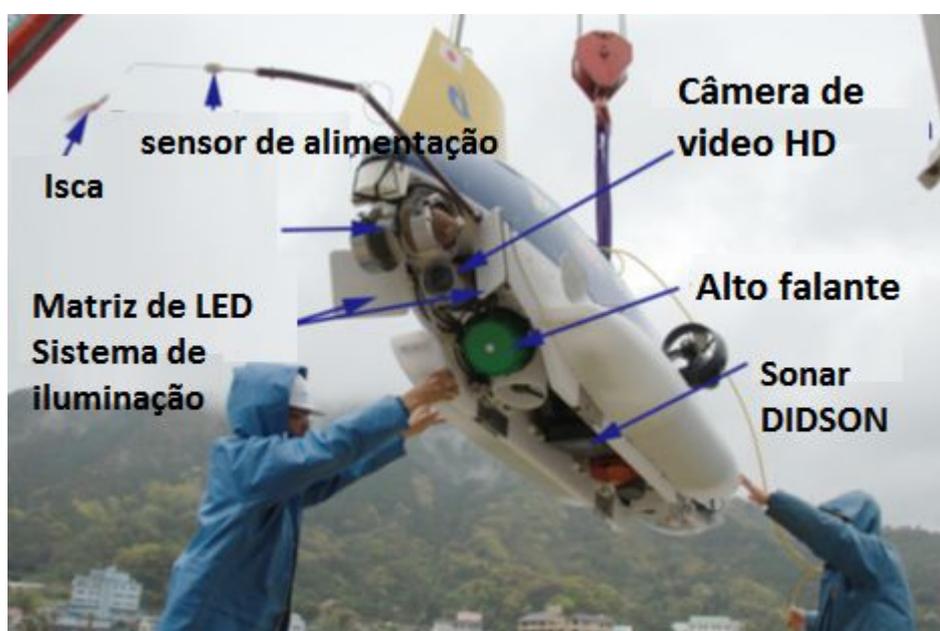


Figura 8.5: Funcionalidades do BA-1. Fonte: Kondo *et al.*, 2010.

8.1.4 Sistema computacional do Bionteractive-1

Para desenvolver eficientemente as tarefas do veículo, os autores do projeto criaram uma placa com múltiplas extensões de entrada/saída. O nome dado à placa foi KOLABOARD, vindo de *KONdo LABOratory Autonomomous Underwater Vehicle controller BOARD*, e,

conforme mostrado na figura 8.6, a KOLARBOARD é constituída de 6 placas: placa da CPU principal, placa de alimentação e periféricos, placa FPGA de entrada e saída, duas placas de múltiplas entradas e saídas e uma placa de comunicação com receptor GPS.

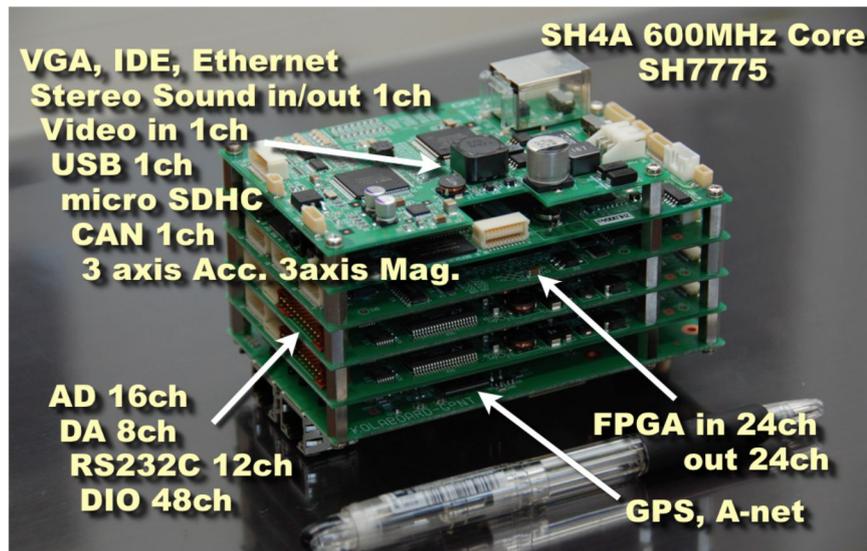


Figura 8.6: Placa controladora KOLABORD. Fonte: Kondo *et al.*, 2010.

O Sistema operacional dessa placa é o *T-Kernel* (variante do Linux) que opera em tempo real. Na tabela 8.2 mostram-se os parâmetros utilizados nas simulações do BA-1 segundo os trabalhos de Kondo *et al.* (2010) e Choi e Kondo (2010).

Tabela 8.2 Parâmetros utilizados nas simulações do BA-1.
Fonte: Choi e Kondo, 2010.

Descrição	Parâmetros
Massa [kg]	$m = 390$
Peso [N]	$W = 3822$
Centro de gravidade [m]	$x_G = 0, y_G = 0, z_G = 0$
Momento de inércia [kgm^2]	$I_x = 26,34, I_y = 305,37, I_z = 305,67$
Produto de inércia [kgm^2]	$I_{xy} = 0, I_{yz} = 0, I_{zx} = 0$
Coeficientes de massa adicional [kg] e [kgm^2]	$A_{11} = 49,12, A_{22} = 311,52, A_{33} = 311,52,$ $A_{44} = 0, A_{55} = 87,63, A_{66} = 87,63$
Massa específica da água [kg/m^3]	$\rho = 1000$
Coeficientes de arrasto linear [kg/s] e [kgm^2/s]	$X_u = -20, Y_v = -200, Z_w = -200, K_p = -10,$ $M_q = -300, N_r = -300,$
Coeficientes de arrasto não linear [kg/m] e [kgm^2]	$X_{ u u} = -30, Y_{ v v} = -300, Z_{ w w} = -300,$ $K_{ p p} = -10, M_{ q q} = -300, N_{ r r} = -200,$
Empuxo [N]	$B = W = 3822$
Centro de empuxo [m]	$x_B = 0, y_B = 0, z_B = -0,15$ $x_{P1} = 0, y_{P1} = 0,47, z_{P1} = 0$

Centro de empuxo de cada propulsor [m]	$x_{P2} = 0, y_{P2} = -0,47, z_{P2} = 0$ $x_{P3} = 0,8, y_{P3} = 0, z_{P3} = 0$ $x_{P4} = -0,8, y_{P4} = 0, z_{P4} = 0$ $x_{P5} = 0,63, y_{P5} = 0, z_{P5} = 0$ $x_{P6} = -0,63, y_{P6} = 0, z_{P6} = 0$
Coeficiente de empuxo do propulsor [N/rps]	$T_{ n n} = 0,42$
Coeficiente de torque do propulsor [N/rps ²]	$Q_{ n n} = 0,0093$
Constante de torque dos motores [Nm/rps ²]	$K_m = 0,362$
Momentos de inércia dos propulsores [kgm ²]	$J_P = 0,1$
Resistência da armadura dos motores [Ω]	$R_a = 0,072$
Tensão nominal dos motores [Ω]	$V_a = 24$

8.2 Veículo Subaquático Nerov

O Nerov (*Norwegian Experimental Remotely Operated Vehicle*) foi desenvolvido pela Divisão de Engenharia e Cibernética do Instituto Norueguês de Tecnologia em 1991. A principal finalidade deste veículo é testar e validar algoritmos de controle convencionais e de inteligência avançada.

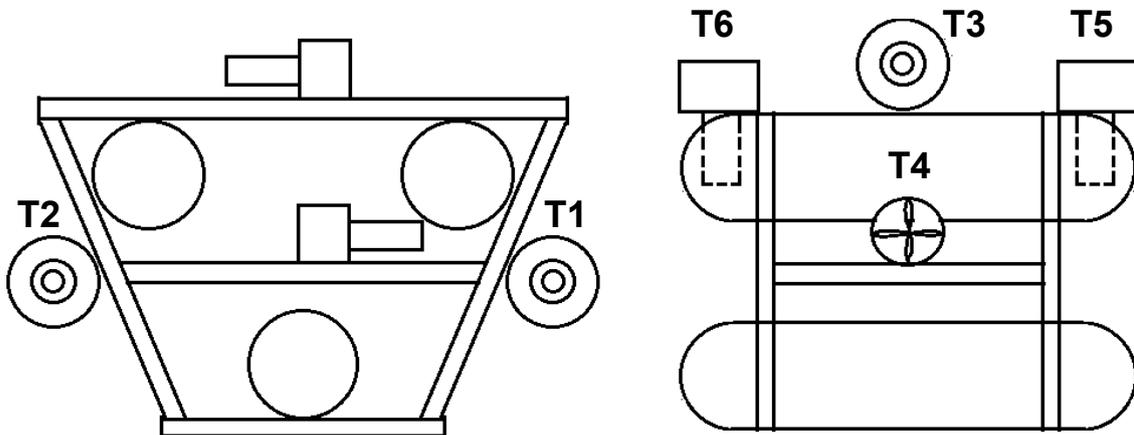


Figura 8.6: Desenho esquemático do veículo Nerov.

Fonte: Fossen e Balchen, 1991.

8.2.1 Sistema de propulsão do Nerov

O sistema de propulsão deste veículo é feito por 6 propulsores em duto com motores elétricos que operam com a tensão máxima de 24 V e 400 W feitos pela *Outboard Marine Cooperation*, vide figura 8.7. Conforme Tavares (2003 apud Fossen e Balchen (1991)), as forças de propulsão são dadas por:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= T_{|n|n}|n_1|n_1 = T_{|n|n}u_1 \\
 T_2 &= -T_{|n|n}|n_2|n_2 = -T_{|n|n}u_2 \\
 T_3 &= T_{|n|n}|n_3|n_3 = T_{|n|n}u_3 \\
 T_4 &= T_{|n|n}|n_4|n_4 = T_{|n|n}u_4 \\
 T_5 &= T_{|n|n}|n_5|n_5 = T_{|n|n}u_5 \\
 T_6 &= -T_{|n|n}|n_6|n_6 = -T_{|n|n}u_6
 \end{aligned}
 \tag{8.1}$$

Considerando a distribuição dos propulsores pode-se descrever a contribuição de força de cada propulsor da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 T_{x1} &= 1, & T_{y1} &= 0, & T_{z1} &= 0 \\
 T_{x2} &= 1, & T_{y2} &= 0, & T_{z2} &= 0 \\
 T_{x3} &= 0, & T_{y3} &= 1, & T_{z3} &= 0 \\
 T_{x4} &= 0, & T_{y4} &= 1, & T_{z4} &= 0 \\
 T_{x5} &= 0, & T_{y5} &= 0, & T_{z5} &= 1 \\
 T_{x6} &= 0, & T_{y6} &= 0, & T_{z6} &= 1
 \end{aligned}
 \tag{8.2}$$

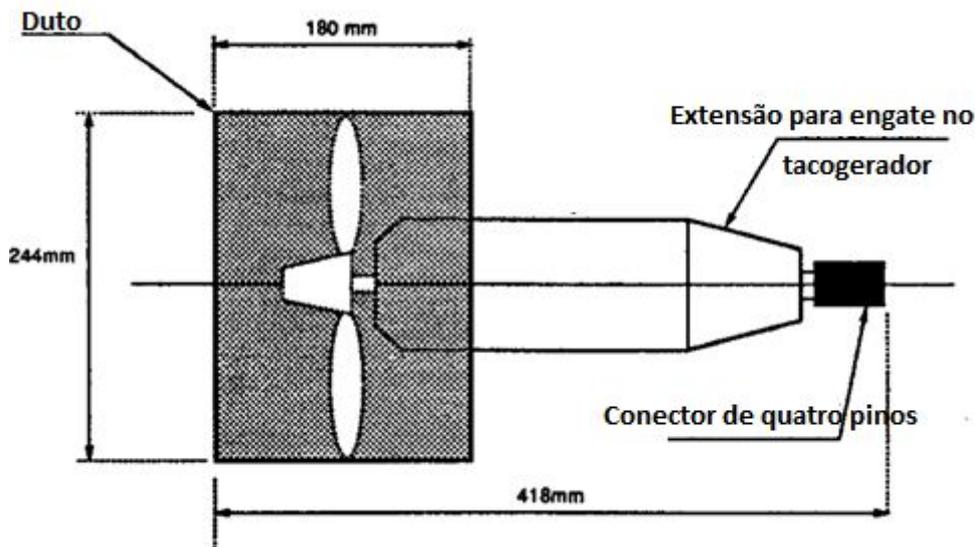


Figura 8.7: Propulsor em duto do Nerov.
Fonte: Fossen e Balchen, 1991.

8.2.2 Sistema de sensoriamento do Nerov

O sistema de sensoriamento do Nerov é baseado nas equações de movimento, descritas no Capítulo 3, que fazem com o sistema de sensoriamento seja independente dos coeficientes hidrodinâmicos do veículo. A estimativa dos estados lineares e angulares é feita individualmente e é comparada com a medição dos sensores.

8.2.3 Sistema computacional do Nerov

O sistema computacional é baseado no sistema *VMEbus* e está localizado nos contêineres superiores do veículo. O processador da placa controladora é o Motorola MC68020 32 bits, com um microprocessador de 16 MHz, além de um coprocessador de ponto flutuante do tipo MC6888, 1 MByte de memória RAM e 512 KBytes memória ROM. O microprocessador possui duas portas seriais RS232, utilizadas para conectar um terminal de acesso e um monitor ao veículo, que possibilitam a programar o sistema de controle.

Além disso, o sistema computacional lida com o sensoriamento e o acionamento dos propulsores por meio de: 12 canais de entrada A/D de 12 bits, 8 portas binárias TTL e 12 canais de saída A/D de 12 bits. Fossen e Balchen (1991) citam que todas as portas são programáveis e o software foi desenvolvido para programar o sistema foi feito em linguagem C.

8.2.4 Parâmetros do Nerov

Na tabela 8.3 exibem-se os parâmetros do veículo Nerov utilizados na simulação, os quais foram retirados dos trabalhos referentes ao projeto e a estrutura de controle (Fossen e Balchen, 1991; Fjellstad, 1994; Tavares, 2003).

Tabela 8.3 Parâmetros utilizados nas simulações do Nerov.
Fonte: Fossen e Balchen, 1991.

Descrição	Parâmetros
Massa [kg]	$m = 185$
Peso [N]	$W = 1813$
Centro de gravidade [m]	$x_G = 0, y_G = 0, z_G = 0$
Momento de inércia [kgm ²]	$I_x = 25, I_y = 50, I_z = 50$
Produto de inércia [kgm ²]	$I_{xy} = 0, I_{yz} = 0, I_{zx} = 0$
Coefficientes de massa adicional [kg] e [kgm ²]	$A_{11} = 30, A_{22} = 80, A_{33} = 80, A_{44} = 15, A_{55} = 30, A_{66} = 30$
Massa específica da água [kg/m ³]	$\rho = 1000$
Coefficientes de arrasto linear [kg/s] e [kgm ² /s]	$X_u = -70, Y_v = -100, Z_w = -100,$ $K_p = -30, M_q = -50, N_r = -50,$
Coefficientes de arrasto não linear [kg/m] e [kgm ²]	$X_{ u u} = -100, Y_{ v v} = -200, Z_{ w w} = -200,$ $K_{ p p} = -50, M_{ q q} = -100, N_{ r r} = -100,$
Empuxo [N]	$B = W = 1813$
Centro de empuxo [m]	$x_B = 0, y_B = 0, z_B = -0,02$
	$x_{P1} = 0,21, y_{P1} = -0,4, z_{P1} = 0,25$

Centro de empuxo de cada propulsor [m]	$x_{P2} = 0,21, y_{P2} = 0,4, z_{P2} = 0,25$ $x_{P3} = 0, y_{P3} = 0, z_{P3} = -0,21$ $x_{P4} = 0, y_{P4} = 0, z_{P4} = 0,21$ $x_{P5} = 0,43, y_{P5} = 0, z_{P5} = -0,23$ $x_{P6} = -0,43, y_{P6} = 0, z_{P6} = -0,23$
Coeficiente de empuxo do propulsor [N/rps]	$T_{ n n} = 0,78896$
Coeficiente de torque do propulsor [N/rps ²]	$Q_{ n n} = 0,0604$
Constante de torque dos motores [Nm/rps ²]	$K_m = 0,362$
Momentos de inércia dos propulsores [kgm ²]	$J_P = 0,1$
Resistência da armadura dos motores [Ω]	$R_a = 0,072$
Tensão nominal dos motores [V]	$V_a = 24$

8.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, explicou-se o funcionamento dos dois VSA que são objeto de estudo deste trabalho. Os parâmetros físicos e a disposição dos propulsores, fornecidos por Choi e Kondo (2010), Fossen (1991) e Tavares (2003), foram utilizados no modelamento matemático dos veículos, conforme os Capítulos 3 e 4. Comparando-se as tabelas 8.2 e 8.3, observa-se que os valores de massa e distância dos propulsores dos dois veículos diferem entre si, por isso, as forças e momentos nos veículos serão diferentes e, conseqüentemente, gerarão em respostas diferentes à trajetória desejada, conforme é mostrado no Capítulo 10.

Capítulo 9

9. Projeto do controlador *fuzzy* takagi-sugeno aplicado no controle tolerante a faltas de propulsores

9.1 Introdução

Neste capítulo será mostrado o desenvolvimento do CTF aplicando a lógica *fuzzy* de Takagi e Sugeno em propulsores virtuais, conforme os trabalhos Santos (2016), Choi e Kondo (2010) e Kondo *et al.* (2010).

9.2 Propulsores virtuais

Com a ocorrência da falta em um sistema, tem-se consequências graves em controladores nominais que operam sem CTF (Omerdic, 2009). Para manter o sistema em operação e garantir o objetivo de controle, pode-se realizar uma realocação da relação de entradas e saídas de um sistema. Após selecionar a configuração de controle, novos parâmetros do controlador devem ser encontrados (Santos, 2016).

De acordo com Santos (2016), para lidar com as faltas dos propulsores, em vez de adaptar o controlador à planta faltante, usa-se um bloco de reconfiguração para adaptar a mesma ao controlador nominal. Sendo assim, a planta faltante junto ao bloco de reconfiguração tenta produzir aproximadamente, para uma determinada entrada u_c , a mesma saída y_c . A estrutura desse método de alocação de faltas de propulsores pode ser vista na figura 9.1, onde tem-se a planta reconfigurada e controlador reconfigurado.

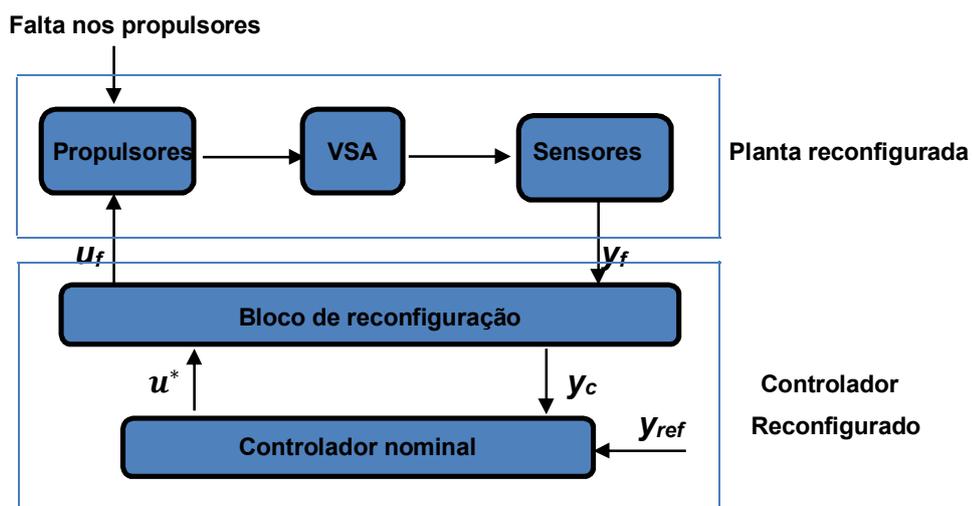


Figura 9.1: Princípio da reconfiguração do controlador para propulsores faltantes. Fonte: Santos, 2016.

Se um propulsor entra em falta, o bloco de reconfiguração se adapta de forma dual, portanto, os “propulsores virtuais” são formados pelo bloco de reconfiguração que mimetiza os outros propulsores. Ao passo em que o controlador reconfigurado consiste em um controlador nominal e o bloco de reconfiguração.

9.3 Método de alocação

Conforme demonstrado no Capítulo 4, a relação entre as forças e momentos horizontais (τ_H) e verticais (τ_V), aplicados aos VSA, e as forças nos propulsores (T_H e T_V) é dada por:

$$\begin{aligned}\tau_H &= B_H T_H \\ \tau_V &= B_V T_V\end{aligned}\quad (9.1)$$

onde $T_H = [T_1, T_2, T_3, T_4]^T$ e $T_V = [T_5, T_6]^T$.

Choi e Kondo (2010) abordam que, para que seja possível o veículo executar os movimentos horizontais e verticais, tem-se que os termos B_H , B_V , T_H e T_V devem cumprir as seguintes condições:

$$\begin{aligned}posto(B_H) &\leq n^\circ \text{ de linhas}(T_H) \\ posto(B_V) &\leq n^\circ \text{ de linhas}(T_V)\end{aligned}\quad (9.2)$$

Ou seja, os postos de B_H e B_V devem ser, respectivamente, menores ou iguais aos valores do número de linhas dos vetores de T_H e T_V . As duas condições da equação 9.12 são atendidas na condição sem falta, pois para os dois veículos estudados neste trabalho:

$$\begin{aligned}posto(B_H) &= 3 < n^\circ \text{ de linhas}(T_H) = 4 \\ posto(B_V) &= n^\circ \text{ de linhas}(T_V) = 2\end{aligned}\quad (9.3)$$

Além disso, as condições da equação 9.12 se mantêm mesmo que um propulsor horizontal entre na condição de falta. Choi e Kondo (2010) citam que veículos desse tipo possuem uma capacidade intrínseca de CTF para movimentos horizontais.

Para os dois veículos consideraram-se as seguintes situações:

1. Sem falta: $posto(B_H) \leq n^\circ \text{ de linhas}(T_H)$ e $posto(B_V) = n^\circ \text{ de linhas}(T_V)$;
2. Um propulsor horizontal faltante: $posto(B_H) = n^\circ \text{ de linhas}(T_H)$ e $posto(B_V) = n^\circ \text{ de linhas}(T_V)$;
3. Dois propulsores horizontais faltantes: $posto(B_H) = n^\circ \text{ de linhas}(T_H)$ e $posto(B_V) = n^\circ \text{ de linhas}(T_V)$;

9.3.1 Sem falta

Caso o veículo não sofra a falta dos propulsores, as forças nos propulsores verticais podem ser obtidas por meio da inversão de B_V , logo:

$$T_V = B_V^{-1} \tau_V \quad (9.4)$$

Já as forças dos propulsores verticais não podem ser calculadas por meio de uma simples inversão, pois a matriz B_H não é quadrada e, portanto, não possui inversa. Para contornar este problema, usa-se a pseudoinversão de B_H :

$$T_H = W_H^{-1} B_H^T (B_H W_H^{-1} B_H^T)^{-1} \tau_H \quad (9.5)$$

onde, W_H é uma matriz que depende dos pesos $0 \leq \omega_i \leq 1$, em que um propulsor em pleno possui $\omega_i = 1$, um propulsor fora de capacidade de operação possui $\omega_i = 0$ e um propulsor com uma falha parcial possui valores intermediários, logo tem-se neste caso:

$$W_H = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_4 \end{bmatrix} \quad (9.6)$$

9.3.2 Falta em um propulsor horizontal

Apesar de um propulsor horizontal entrar em falta, a condição da equação 9.3 ainda é satisfeita. Portanto, os valores de T_V e T_H são calculados por meio das equações 9.4 e 9.5, contudo, tem-se que $\omega_i = 0$, para o i ésimo propulsor horizontal faltante.

9.3.3 Falta em dois propulsores horizontais dentro do mesmo plano de ação

Conforme observado na equação 9.4, a falta de dois propulsores horizontais não influencia diretamente nos movimentos verticais. Contudo, deve-se avaliar qual plano de ação horizontal foi afetado.

9.3.3.1 Falta nos propulsores 1 e 2

Caso os propulsores 1 e 2 entrem em falta, tem-se a modificação da matriz de configuração dos propulsores horizontais \hat{B}_H para:

$$\hat{B}_H = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ b & -b \end{bmatrix} \quad (9.7)$$

Conseqüentemente, as forças e momentos τ_H são calculadas da seguinte forma:

$$\tau_H = \begin{bmatrix} F_y \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ b & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} \quad (9.8)$$

Nota-se que para este caso, o posto de B_H equivale a:

$$\text{posto}(\hat{B}_H) = n^\circ \text{ de linhas}(T_H) \quad (9.9)$$

Levando-se em consideração que $F_y \neq 0$ e $M_z = 0$ quando $T_3 = T_4$ e $F_y = 0$ e $M_z \neq 0$ quando $T_3 = -T_4$, a trajetória desejada é mantida de acordo com a figura 9.3, em que, por meio dos propulsores 3 e 4, o veículo utiliza os movimentos de avanço e guinada independentemente.

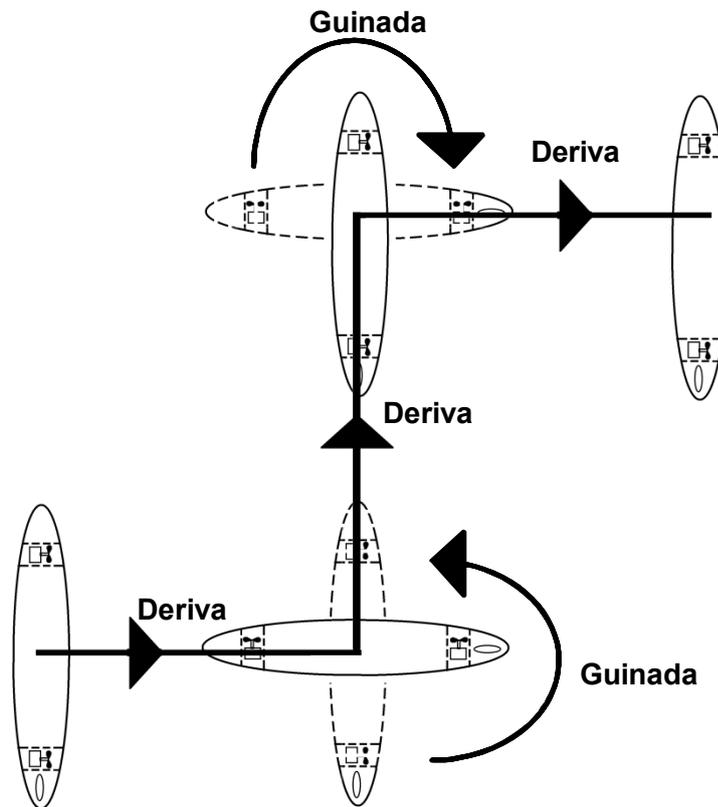


Figura 9.2: Seguimento de trajetória no plano horizontal usando deriva e guinada.
Fonte: Santos, 2016.

9.3.3.2 Falta nos propulsores 3 e 4

Similarmente ao caso anterior, se os propulsores 3 e 4 entrarem em falta, tem-se que a matriz de configuração dos propulsores horizontais B_H determinada por:

$$\hat{B}_H = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -a & a \end{bmatrix} \quad (9.10)$$

Conseqüentemente, o vetor de forças e momentos τ_H torna-se:

$$\tau_H = \begin{bmatrix} F_x \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \quad (9.11)$$

Novamente, tem-se a seguinte relação entre \hat{B}_H e T_H :

$$\text{posto}(\hat{B}_H) = n^\circ \text{ de linhas}(T_H) \quad (9.12)$$

Logo, tem-se neste caso o fato de $F_x \neq 0$ e $M_z = 0$ quando $T_1 = T_2$ e $F_x = 0$ e $M_z \neq 0$ quando $T_1 = -T_2$, sendo assim, os movimentos de avanço e guinada podem ser controlados independentemente. Então a trajetória desejada é mantida conforme a figura 9.4, em que, por meio propulsores 1 e 2, o veículo utiliza os movimentos de avanço e guinada. Choi e Kondo

(2010) abordam o fato deste caso exigir mais força de propulsão para o veículo Biointeractive-1, pois tem-se um amortecimento hidrodinâmico maior.

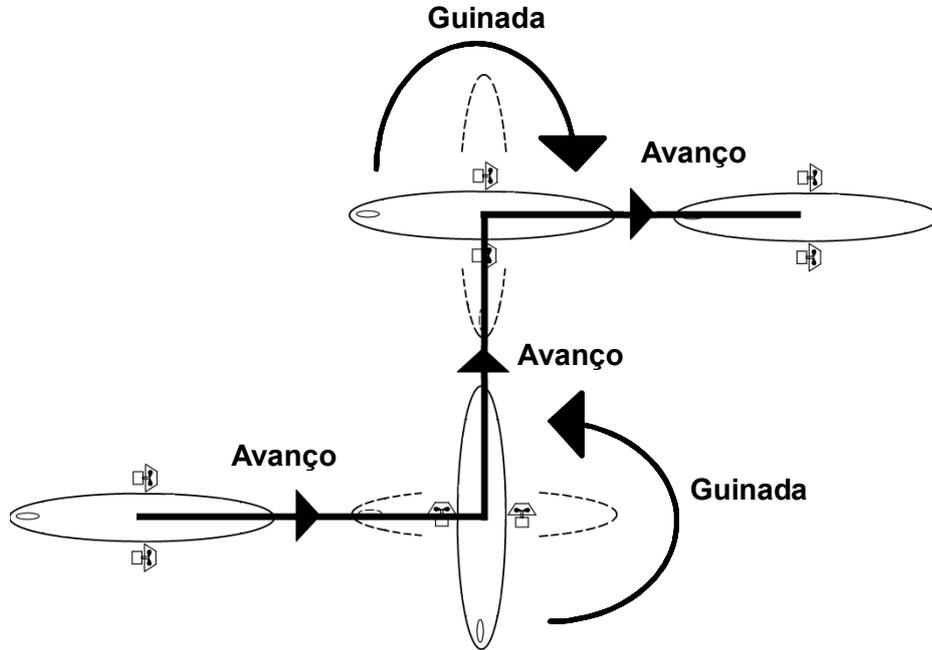


Figura 9.3: Seguimento de trajetória no plano horizontal usando avanço e guinada. Fonte: Santos, 2016.

9.4 Falta em dois propulsores em diferentes planos de ação

De acordo com Choi e Kondo (2010), quando ocorre faltas em propulsores em diferentes planos de ação, nos pares 1 e 3, 1 e 4, 2 e 3 ou 2 e 4, o vetor de forças e momentos τ_H torna-se equivalente a:

$$\tau_H = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \beta & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \end{bmatrix} \quad (9.13)$$

onde, $\beta = -a$ quando $i = 1$, $\beta = a$ quando $i = 2$, $\gamma = b$ quando $j = 3$ e $\gamma = -b$ quando $j = 4$. Neste caso, tem-se que a seguinte relação entre \hat{B}_H e T_H :

$$\text{posto}(\hat{B}_H) = \text{dim}(T_H) \quad (9.14)$$

Diferentemente dos casos anteriores, as forças de propulsão para o veículo completar a trajetória desejada são indeterminadas, pois, conforme mostrado na equação 9.24, o número de propulsores é menor que o número de forças e momentos resultantes.

Para lidar com esta situação, Santos (2016) cita em seu trabalho os seguintes passos para lidar com as faltas dos propulsores em planos de ação diferentes:

9.4.1 Passo 1

Usa-se a matriz de alocação completa para calcular as forças e momentos aplicados nos VSA:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = W_H^{-1} B_H^T (B_H W_H^{-1} B_H^T)^{-1} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (9.15)$$

em que B_H possui todos os termos:

$$B_H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -a & a & b & -b \end{bmatrix} \quad (9.16)$$

$$F_x = (\tau)_x, \quad F_y = (\tau)_y, \quad e \quad M_z = (\tau)_z \quad (9.17)$$

Santos (2016) aborda que a diferença deste método está no fato de existirem propulsores fora de operação e que não estão agindo fisicamente no controle retroalimentado. Além disso, tem-se a vantagem de o sistema não sofrer com a mudança abrupta na sua configuração do sistema.

9.4.2 Passo 2

Durante o cálculo da pseudo inversão dos propulsores virtuais, usa-se valores diferentes para os propulsores virtuais na matriz de pesos W_H . Para isso, os valores de ω_i são definidos por:

$$\omega_i = \begin{cases} 0 < \omega_\varphi < 1, & \text{se o } i\text{ésimo propulsor possui falta parcial} \\ 1, & \text{se o } i\text{ésimo propulsor está em pleno funcionamento} \end{cases} \quad (9.18)$$

em que, ω_φ é um elemento regulador calculado automaticamente que depende da falta parcial e, no caso do propulsor virtual, é determinado por:

$$\omega_\varphi = \left| \frac{\varphi_r - \varphi_c}{|\varphi_r| + \epsilon} \right| + \epsilon \quad (9.19)$$

Na equação 9.19, o termo φ_r representa o movimento de guinada de referência, φ_c equivale ao movimento de guinada calculado e ϵ é um valor arbitrário usado para evitar possíveis divisões por zero, além de valores nulos para ω_φ (Santos, 2016).

9.4.3 Passo 3

Usa-se a soma da força dos propulsores virtuais e dos propulsores reais no mesmo plano de ação nos propulsores reais. Santos (2016) cita que este passo possui uma justificativa matemática e é o principal, em vista de alocar forças virtuais nos propulsores

restantes. Caso um sistema possua n graus de liberdade e m atuadores, em que ($m < n$), existem $n-m$ estados independentes.

De acordo com Santos (2016), supondo um VSA com dois propulsores horizontais, vide figura 9.5, tem-se um corpo rígido planar movendo-se em um plano ortogonal à direção da gravidade. Considerando o conjunto $\{e_1, e_2\}$ como referencial inercial e fixando o centro de massa do veículo no conjunto $\{f_1, f_2\}$, em que a força de propulsão é aplicada na direção do eixo f_1 . Além disso, os conjuntos de eixos $\{g_1, g_2\}$ e $\{h_1, h_2\}$ são fixados como centro de massa dos propulsores e considera-se que as forças dos propulsores coincidam com os eixos f_1 e g_1 .

Logo, pode-se descrever a configuração de espaço pela localização dos referenciais $\{f_1, f_2\}$, $\{g_1, g_2\}$ e $\{h_1, h_2\}$ relativos ao referencial inercial $\{e_1, e_2\}$. O conjunto $\{f_1, f_2\}$ é especificado em relação aos eixos $\{g_1, g_2\}$ e $\{h_1, h_2\}$ por meio de um elemento $SE(2)$. Os conjuntos $\{g_1, g_2\}$ e $\{h_1, h_2\}$ são unicamente determinados pelas suas orientações relativas ao conjunto $\{f_1, f_2\}$ por meio de um elemento $SO(2)$. Desta forma, a configuração para um i -ésimo plano de ação é determinada por:

$$Q(i) = SE(2) \times SO(2) \quad (9.20)$$

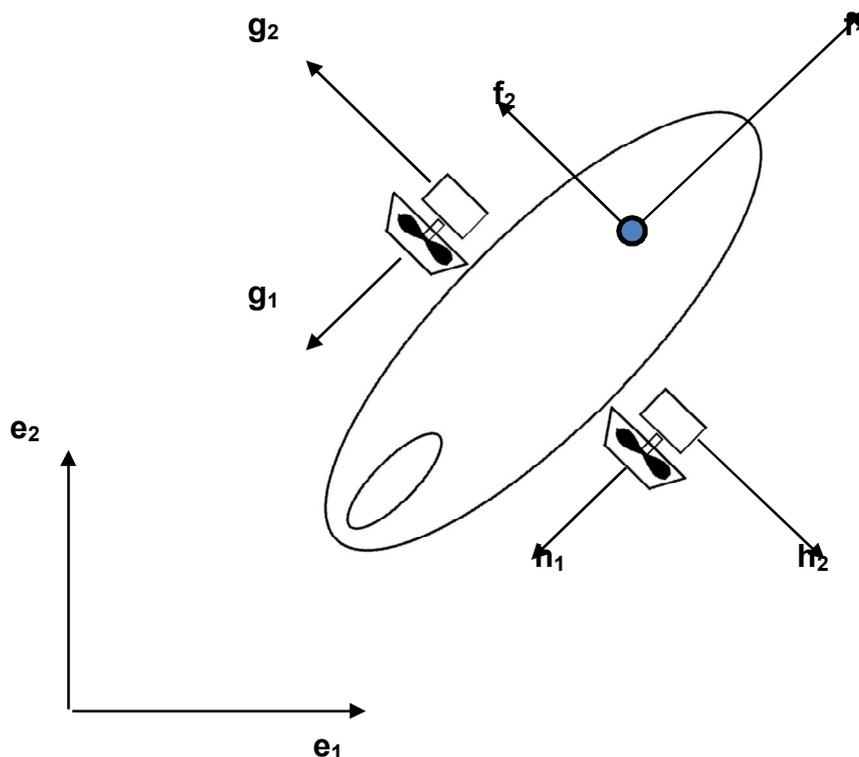


Figura 9.4: Modelo matemático para o VSA . Fonte: Santos (2016).

Seja $q = (q^1, \dots, q^n) \in Q(i) \in Q = \mathbb{R}^n$ a configuração matemática do sistema, $\{F_a : a = 1, \dots, m\}$ o co-vetor de entradas e $Y_a = g(F_a) + h(F_a) : a = 1, \dots, m$ os vetores de entrada, as entradas de controle (u_1, \dots, u_m) pertencem ao conjunto $\mathcal{U}(q, \dot{q}) \subset \mathbb{R}^m$. Então, o operador ∇ é intitulado como a conexão de Levi-Cevita para o sistema mecânico e a equação do movimento no plano $Q(i)$ é descrita por:

$$\nabla \dot{q}^i_{\dot{q}^i} = \sum_{n=1}^m Y_n^i(q^i) u_n^i(t) \quad (9.21)$$

Para os dois veículos subaquáticos tem-se dois propulsores para cada plano de ação horizontal, portanto, pode-se projetar a força de um propulsor horizontal faltante em outro propulsor horizontal no mesmo plano de ação. Este procedimento entra de acordo com a equação do movimento 9.21 (Santos, 2016). Supondo um caso em que ocorra a falha parcial do propulsor 1 e a falta total do propulsor 4, o CTF atribuiria o seguinte valor para os torques horizontais:

$$T_H = [\check{T}_{N1}, (\check{T}_{V1} + T_2), (T_3 + \check{T}_4), 0] \quad (9.22)$$

em que \check{T}_{N1} é o valor nominal da força do propulsor T_1 com a falha, \check{T}_{V1} é a força do propulsor virtual projetado no propulsor T_2 que compensa o propulsor T_1 e \check{T}_4 é o propulsor virtual projetado no propulsor T_3 que compensa o propulsor T_4 .

Pode-se generalizar a equação para T_H conforme os possíveis casos de falta em dois propulsores horizontais conforme a equação 9.23:

$$T_H = \begin{cases} [0, (\check{T}_1 + T_2), 0, (\check{T}_3 + T_4)], & \text{se } T_1 = 0 \text{ e } T_3 = 0 \\ [0, (\check{T}_1 + T_2), (T_3 + \check{T}_4), 0], & \text{se } T_1 = 0 \text{ e } T_4 = 0 \\ [(T_1 + \check{T}_2), 0, 0, (\check{T}_3 + T_4)], & \text{se } T_2 = 0 \text{ e } T_3 = 0 \\ [(T_1 + \check{T}_2), 0, (T_3 + \check{T}_4), 0], & \text{se } T_2 = 0 \text{ e } T_4 = 0 \end{cases} \quad (9.23)$$

9.4.4 Passo 4

Com os valores de T_H , faz-se a projeção nos propulsores remanescentes usando a seguinte matriz de rotação em relação à coordenada z:

$$R_\rho = \begin{bmatrix} \cos(\rho) & -\text{sen}(\rho) \\ \text{sen}(\rho) & \cos(\rho) \end{bmatrix} \quad (9.24)$$

onde, $\rho = \delta + \gamma_r$, $\delta = \text{atan}\left(\frac{a}{b}\right)$ e $\gamma_r = \text{atan}(\varphi_r)$.

A finalidade de utilizar a matriz da equação 9.24 é diminuir a influência e a restrição geométrica dos propulsores remanescentes, portanto tem-se a seguinte relação entre os propulsores virtuais \hat{T}_H e os remanescentes \check{T}_H :

$$\hat{T}_H = R_\rho \check{T}_H \quad (9.25)$$

9.4.5 Passo 5

Então, calculam-se os torques horizontais:

$$\tau_H = B_{fH} \bar{T}_H \quad (9.26)$$

onde \bar{T}_H é formado pelas forças dos propulsores T_H e \check{T}_H

Para o caso de falta parcial no propulsor 1 e falta total no propulsor 4 tem-se:

$$T_H = [\check{T}_{N1}, (\check{T}_{V1} + T_2), (T_3 + \check{T}_4), 0] \quad (9.27)$$

9.4.6 Passo 6

Neste trabalho, tem-se como finalidade calcular as forças que compensam as dos propulsores faltantes na conexão de Levi-Cevita. Essa contribuição é definida como incerta, pois é incerto como os propulsores sadios devem ser ativados quando ocorre a falta (Santos, 2016). Para o cálculo das variáveis linguísticas, utilizaram-se funções de pertinência do tipo triangular, pois, conforme Neto *et al.* (2006), estas funções são de uso corrente em problemas de engenharia. Utilizou-se o método de inferência de Takagi-Sugeno de ordem zero no conjunto de regras *fuzzy* devido a simplicidade de implementação.

9.4.6.1 Implementação dos propulsores virtuais

Como foi dito no começo da subseção 9.4.1, os propulsores virtuais atuam no mesmo plano de ação do propulsor faltante. Isso é feito a partir da mimetização dos propulsores faltantes levando-se em consideração o erro da força que deveria ser desenvolvida pelos mesmos $\tau_{Erro} = [-100, 100](N)$ e a sua derivada de primeira ordem $\dot{\tau}_{Erro} = [-100, 100](\frac{N}{s})$. Sendo assim, pode-se utilizar os propulsores virtuais tanto para a falta (perda total da função requerida) quanto para a falha (perda parcial da função requerida).

As variáveis linguísticas utilizadas para τ_{Erro} e $\dot{\tau}_{Erro}$ são representadas por: NG (Negativo Grande), NM (Negativo Médio), NP (Negativo Pequeno), NULO, PP (Positivo Pequeno), PM (Positivo Médio) e PG (Positivo Grande). As funções de pertinência triangulares podem ser vistas nas figuras 9.6 e 9.7, enquanto a superfície de controle é exibida na figura 9.8.

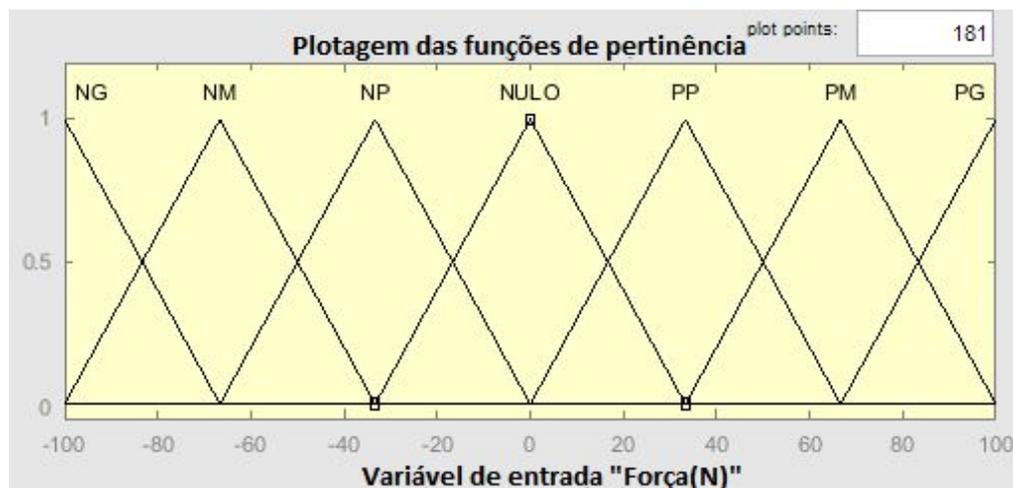


Figura 9.5: Funções de pertinência triangular para a variável Força(N). Fonte: O autor.

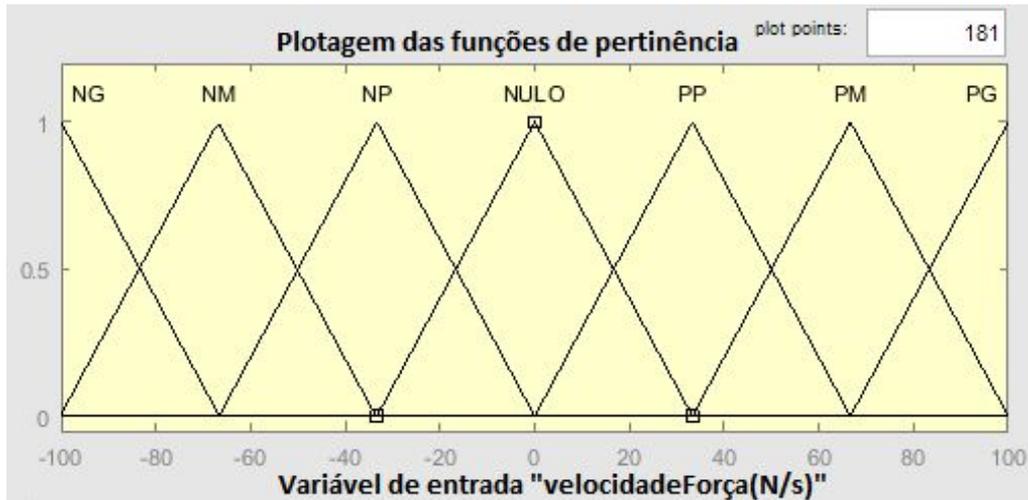


Figura 9.6: Funções de pertinência triangular para a variável VelocidadeForça(N/s).
Fonte: O autor.

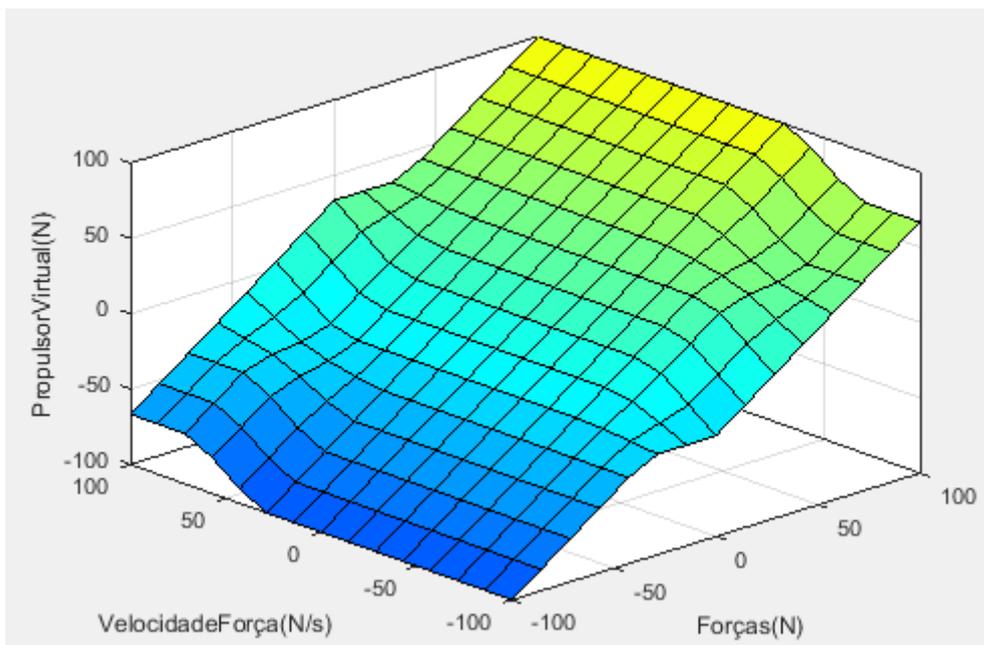


Figura 9.7: Superfície de regras para funções de pertinência gaussianas.
Fonte: O autor.

Na tabela 9.1 mostram-se as saídas para o conjunto de regras estabelecidas, em que CGN representa o Controle Grande Negativo, CMN representa o Controle médio Negativo, CPN representa o Controle Pequeno Negativo, NULO representa zero, CPP representa o Controle Pequeno Positivo, CMP representa o Controle Médio Positivo e CGP representa o Controle Grande Positivo.

Tabela 9.1: Formato tabular do conjunto de regras. Fonte: O autor.

$\dot{\tau}_{Erro}/\tau_{Erro}$	NG	NM	NP	NULO	PP	PM	PG
NG	CGN	CMN	CPN	CPN	NULO	CPP	CPP
NM	CGN	CMN	CPN	NULO	CPP	CPP	CPP
NP	CGN	CMN	CPN	NULO	CPP	CMP	CGP
NULO	CGN	CMN	CPN	NULO	CPP	CMP	CGP
PP	CGN	CMN	CPN	NULO	CPP	CMP	CGP
PM	CMN	CPN	CPN	NULO	CPP	CMP	CGP
PG	CMN	CPN	NULO	CPP	CPP	CMP	CGP

Conforme observa-se na figura 9.8 e na tabela 9.1, as regras da lógica *fuzzy* de Takagi-Sugeno do CTF desenvolvido levaram em consideração os fatores $\dot{\tau}_{Erro}$ e τ_{Erro} . Contudo, diminuiu-se a influência da derivada de primeira ordem no conjunto de regras. Fez-se isso para evitar torques bruscos e oscilações excessivas quando ocorrem desativações de propulsores faltantes, pois, nesses casos, o módulo de $\dot{\tau}_{Erro}$ supera a ordem 100 N/s.

Vale salientar que poderia ser utilizado um sistema *fuzzy* de Takagi-Sugeno de primeiro grau, com um termo multiplicador para reduzir os efeitos de pico da desativação dos propulsores. Porém, optou-se por utilizar um sistema de ordem zero e modificar as regras do conjunto.

9.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo foi mostrada a estratégia de CTF desenvolvida nesta dissertação. Exibiu-se o conjunto de regras utilizado na lógica *fuzzy* Takagi-Sugeno de ordem zero, assim como as variáveis linguísticas $\dot{\tau}_{Erro}$ e τ_{Erro} aplicadas na mesma. Decidiu-se utilizar a função de pertinência triangular para as definições de erro de forças e a sua derivada, além de diminuir o alto impacto da derivada do erro ($\dot{\tau}_{Erro}$), que ocorre quando o propulsor entra em estado de falta, por meio do conjunto de regras.

Capítulo 10

10. Resultados e discussões

Para realizar as simulações, utilizaram-se os modelos matemáticos propostos por Choi e Kondo (2010) e Fossen (1994) e os modelos desenvolvidos no Matlab® por Santos (2012), vistos nos Capítulos 3, 4 e 9. Partindo-se dos parâmetros dos dois veículos, realizaram-se simulações com cada veículo em casos em linha reta no eixo x , sendo o primeiro com uma condição de falta e falha em dois propulsores horizontais em planos de ação diferentes e o segundo com duas situações de falta em dois propulsores horizontais em planos de ação diferentes. Portanto, realizaram-se as seguintes simulações numéricas:

- Falha de 50% no propulsor horizontal 1 e falta no propulsor horizontal 4;
- Faltas nos propulsores horizontais 1 e 4;

Para cada situação de falta, o veículo percorre uma trajetória de 20 metros no eixo x . Esse procedimento foi feito devido ao fato dos VSA do tipo torpedo, tal como o BA-1, desenvolverem trajetórias orientadas no eixo x do veículo.

Os componentes da trajetória de posição, velocidade e aceleração desejadas para cada intervalo de tempo são dados por uma função de quinta de ordem que, conforme Cardozo (2013) cita, faz com que as velocidades iniciais e finais sejam nulas e a velocidade seja máxima no meio da trajetória.

O ganhos de K_p , K_d e K_i otimizados escolhidos para o controle de realimentação linearizante foram:

- $K_p = 10$, $K_d = 5$ e $K_i = 0,01$ para o veículo BA-1 (Santos, 2016).
- $K_p = 12$, $K_d = 6$ e $K_i = 0,6$ para o veículo Nerov (Tavares, 2003).

Visando mostrar viabilidade da lógica *fuzzy* frente a estratégia convencional de apenas somar os erros de propulsão nos propulsores que se encontram no mesmo plano de ação, realizaram-se duas simulações com o veículo BA-1, sendo que nos dois casos ocorreram faltas no propulsor 2 no instante $t = 20$ s e no propulsor 4 no instante $t = 60$ s, respectivamente. Nas figuras 10.1, 10.2 e 10.3 mostram-se, respectivamente, os erros de trajetória, as forças nos propulsores e o torque total do sistema quando se realiza a soma dos erros de propulsão nos propulsores no mesmo plano de ação. Os dados das forças e torque total do sistema foram retirados do próprio Simulink ® em cada instante da simulação (0,1 s), sendo que, para o cálculo do torque total dos propulsores, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$\tau_{sistema} = \sum_{i=1}^6 \sqrt{\tau_i^2} \quad (10.1)$$

em que τ_i representa o torque do i -ésimo propulsor do veículo

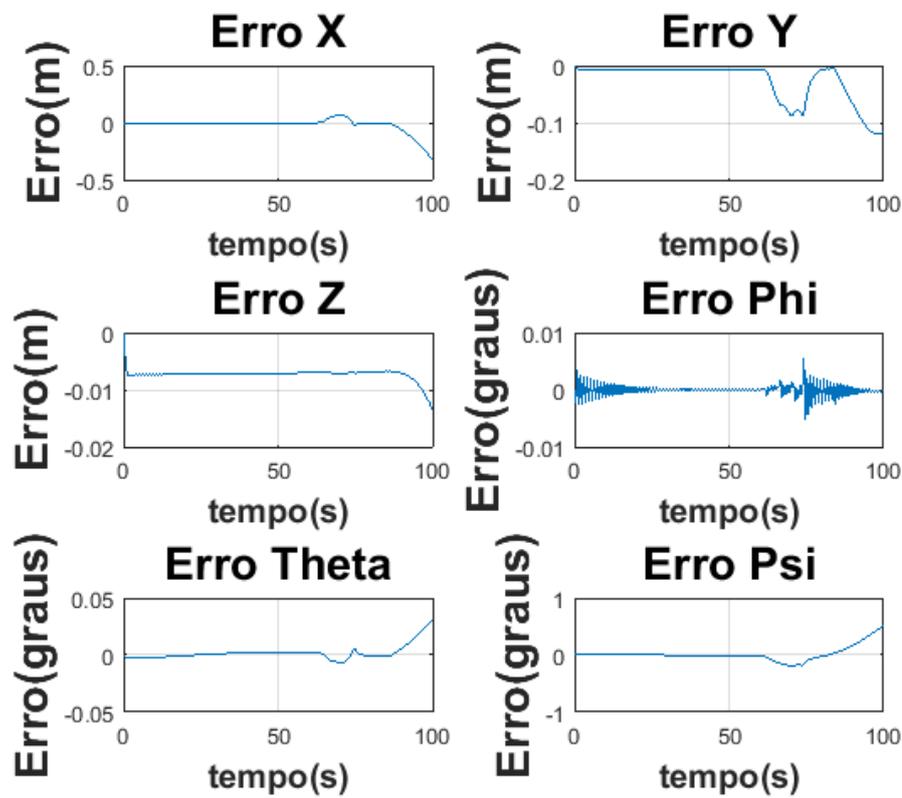


Figura 10.1: Erros de trajetória aplicando a soma dos erros de propulsão.
Fonte: O autor.

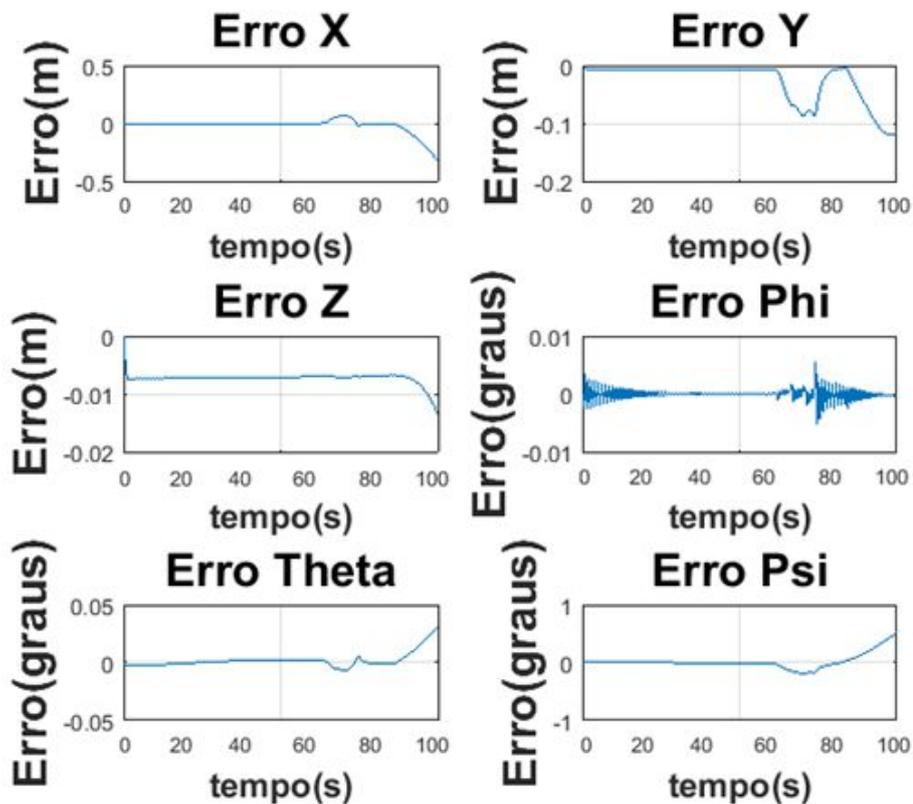


Figura 10.2: Forças nos propulsores aplicando a soma dos erros de propulsão.
Fonte: O autor.

A partir do instante $t = 60$ s, tem-se picos de forças nos propulsores não faltantes atingindo valores próximos ao limite de 100 N, além de elevados picos de torque total no sistema e crescentes erros de trajetória. A forma como a falta de dois propulsores horizontais afeta os propulsores verticais é prevista por Fossen (1994), pois os 5 graus de liberdade são completamente acoplados.

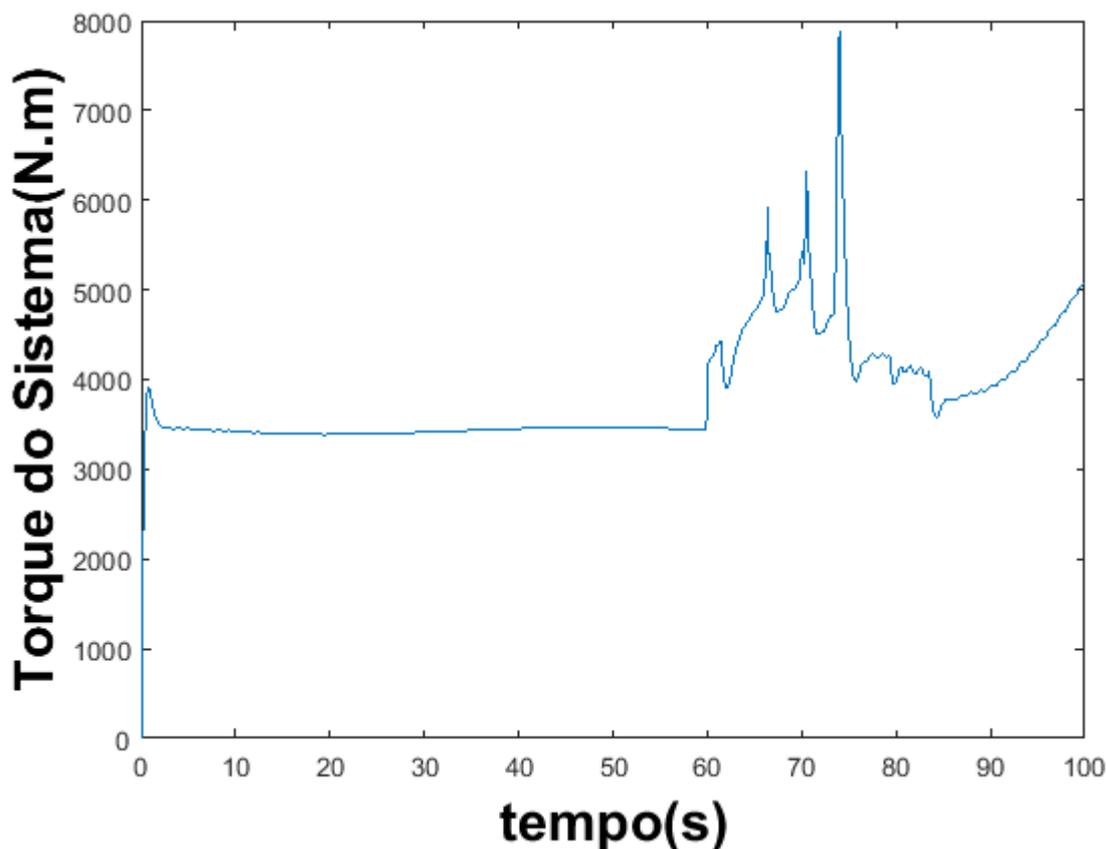


Figura 10.3: Torque total do sistema aplicando a soma dos erros de propulsão.
Fonte: O autor.

Quando se utiliza a lógica *fuzzy* no CTF, tem-se uma suavização do efeito das faltas nos propulsores sadios, pois, conforme visto no Capítulo 9, a mimetização dos propulsores leva em conta o parâmetro velocidade de força ($\dot{\tau}$) e, desta forma, tem-se os resultados mostrados nas figuras 10.4, 10.5 e 10.6.

Pode-se observar que os picos de força da figura 10.5 são inferiores aos exibidos na figura 10.2, o que leva a um menor desgaste dos propulsores. Além disso, ao comparar-se as figuras 10.3 e 10.6 e as figuras 10.4 e 10.1, observa-se que o pico do torque total do sistema do CTF desenvolvido e o erro máximo de trajetória são inferiores aos obtidos na soma dos erros de propulsão.

Portanto, pode-se concluir que não basta apenas somar os erros ($\dot{\tau}_{Erro}$) das forças dos propulsores nos propulsores faltantes e adicioná-los aos propulsores faltantes, pois, conforme Santos (2016), a aplicação da lógica *fuzzy* com propulsores virtuais torna o sistema mais preciso, além de atenuar possíveis picos de força nos propulsores.

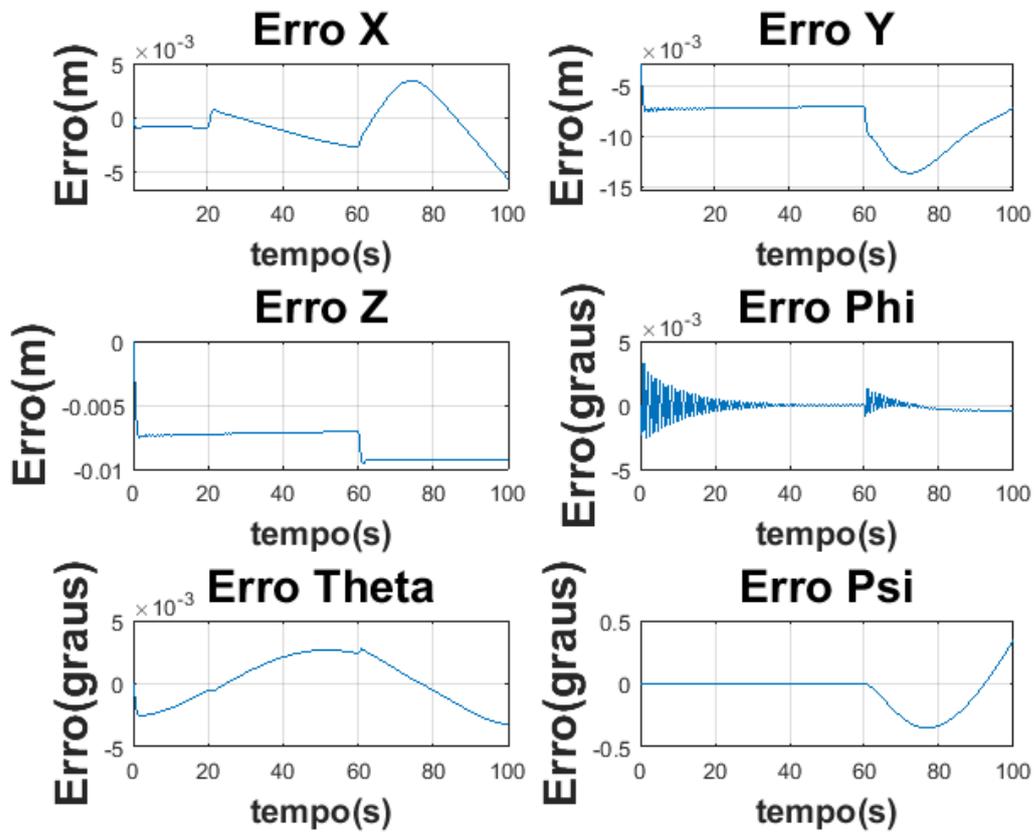


Figura 10.4: Erros de trajetória aplicando o CTF com lógica *fuzzy*.
Fonte: O autor.

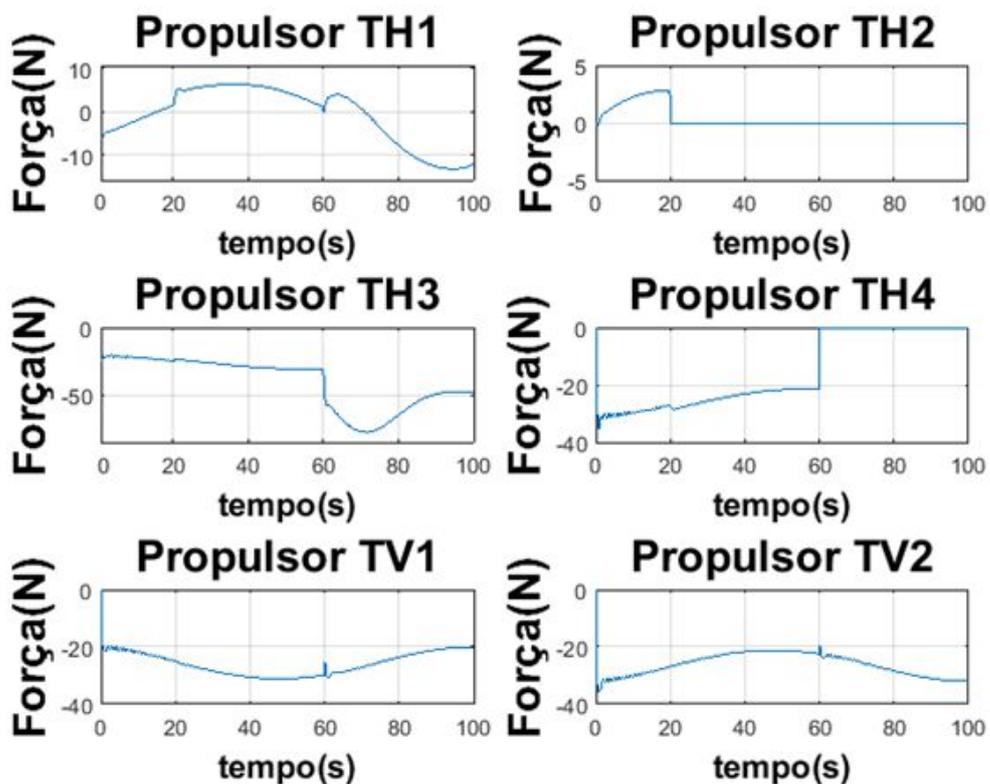


Figura 10.5: Forças nos propulsores aplicando o CTF com lógica *fuzzy*.
Fonte: O autor.

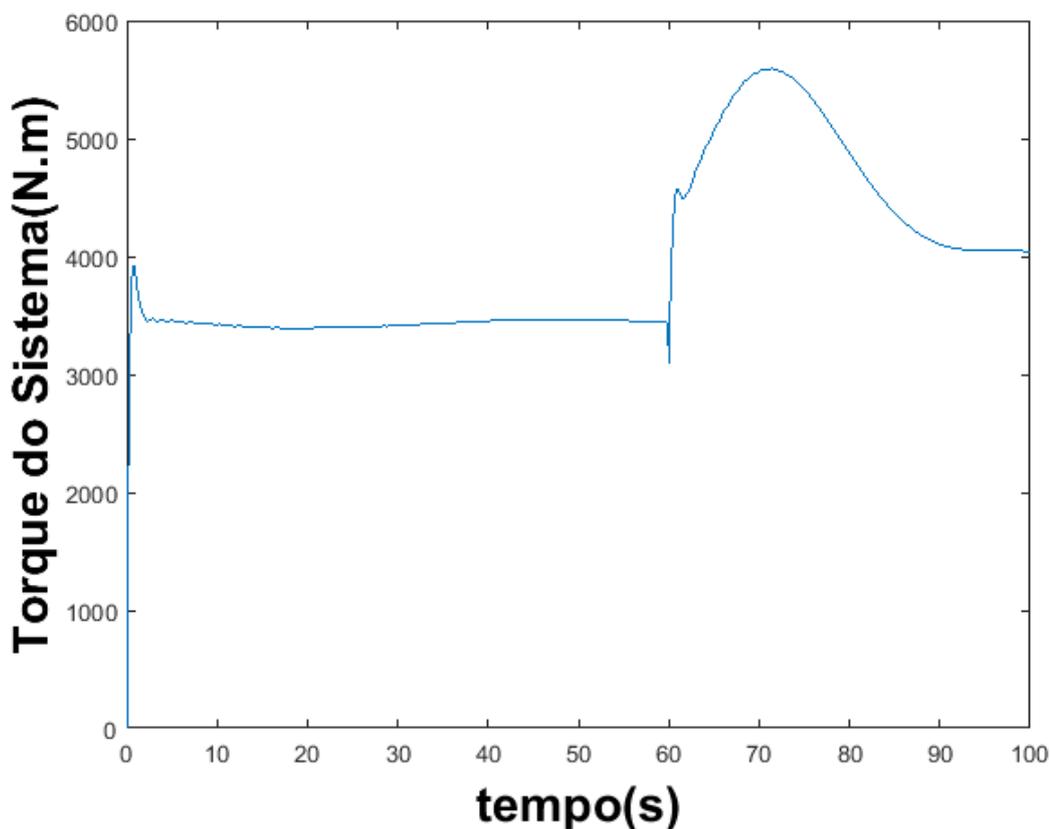


Figura 10.6: Torque total do sistema no sistema aplicando o CTF com lógica *fuzzy*.
Fonte: O autor.

10.1 Simulações para a condição falha de 50% no propulsor 1 e falta no propulsor 4

Neste caso, tem-se que a falha de 50% no propulsor 1 ocorre no instante de tempo $t = 20$ s e a falta no propulsor 4 ocorre no instante $t = 60$ s. Portanto, o CTF teve que lidar com uma falha e uma falta em instantes de tempo diferentes. A falha de T1 influencia diretamente o movimento do veículo no eixo x pois, conforme é mostrado na tabela 8.1, T1 e T2 possuem influência direta no movimento de avanço. Da mesma forma, a falta de T4 influencia diretamente no movimento de deriva, que é controlado pelos propulsores T3 e T4.

10.1.1 Veículo Nerov

Conforme as figuras 10.7 e 10.9, não obtiveram-se grandes desvios neste caso para o veículo Nerov, pois o erro máximo foi da ordem de milímetros nos eixos x , y e z . Além disso, com a falta de T4, tem-se um aumento do erro no eixo y . Isso era previsto, pois, conforme a tabela 8.2, os propulsores T3 e T4 são responsáveis pelo movimento de deriva, que leva a uma perda parcial e uma perda total de dois dos propulsores horizontais ocasiona um desvio em x e em y .

Na figura 10.8 são mostradas as forças nos propulsores do VSA Nerov para esta condição. Pode-se observar que ocorrem picos de forças no instante $t = 60$ s quando T4 entra em falta. O propulsor T3 obteve o maior pico de força, chegando em módulo a 30 N, em vista do fato de compensar a falta de T4 integralmente.

Trajetória do Veículo Subaquático

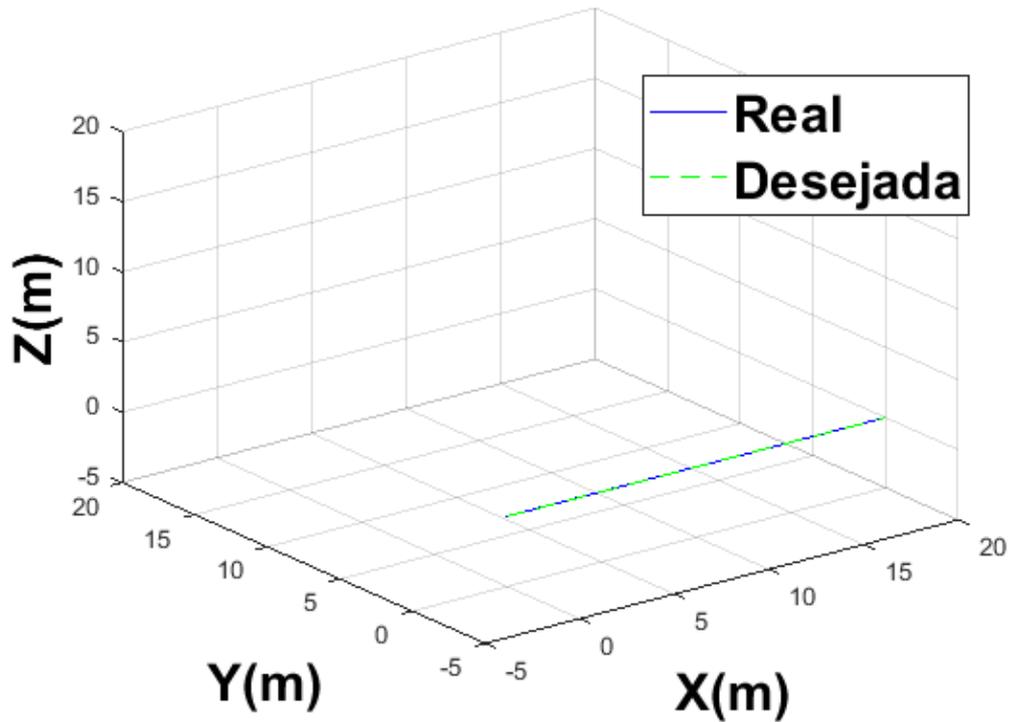


Figura 10.7: Trajetória do veículo Nerov com falha em T1 e falta em T4.
Fonte: O autor

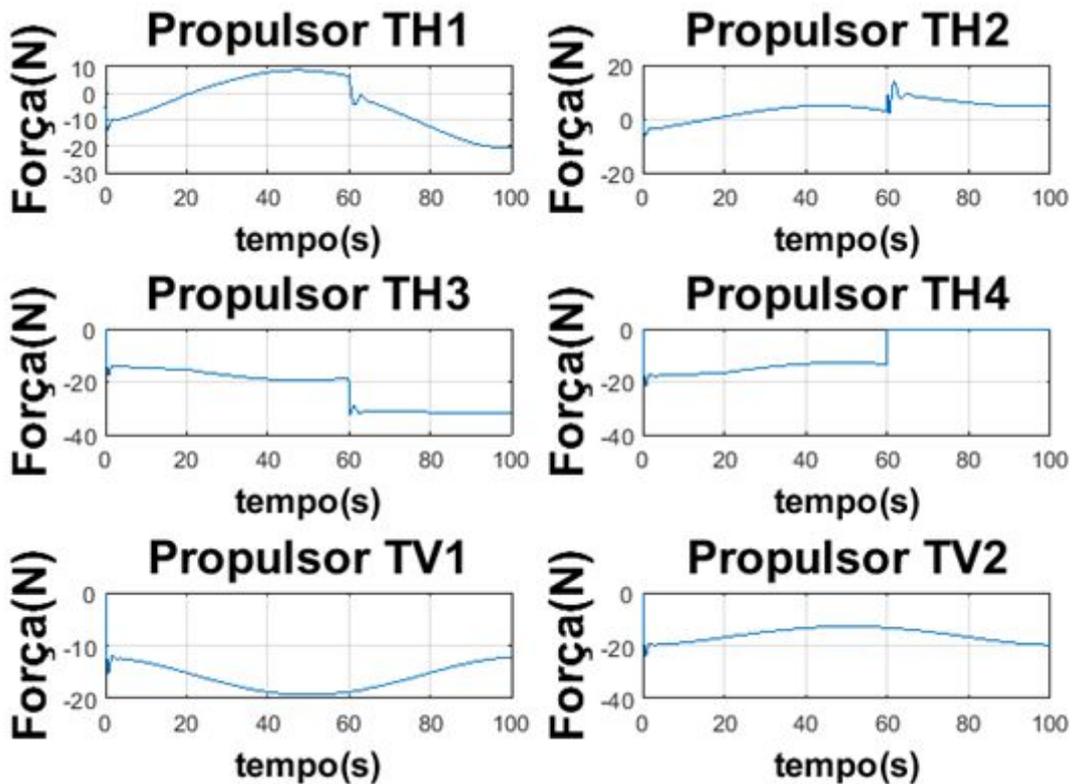


Figura 10.8: Forças nos propulsores do veículo Nerov com falha em T1 e falta em T4.
Fonte: O autor.

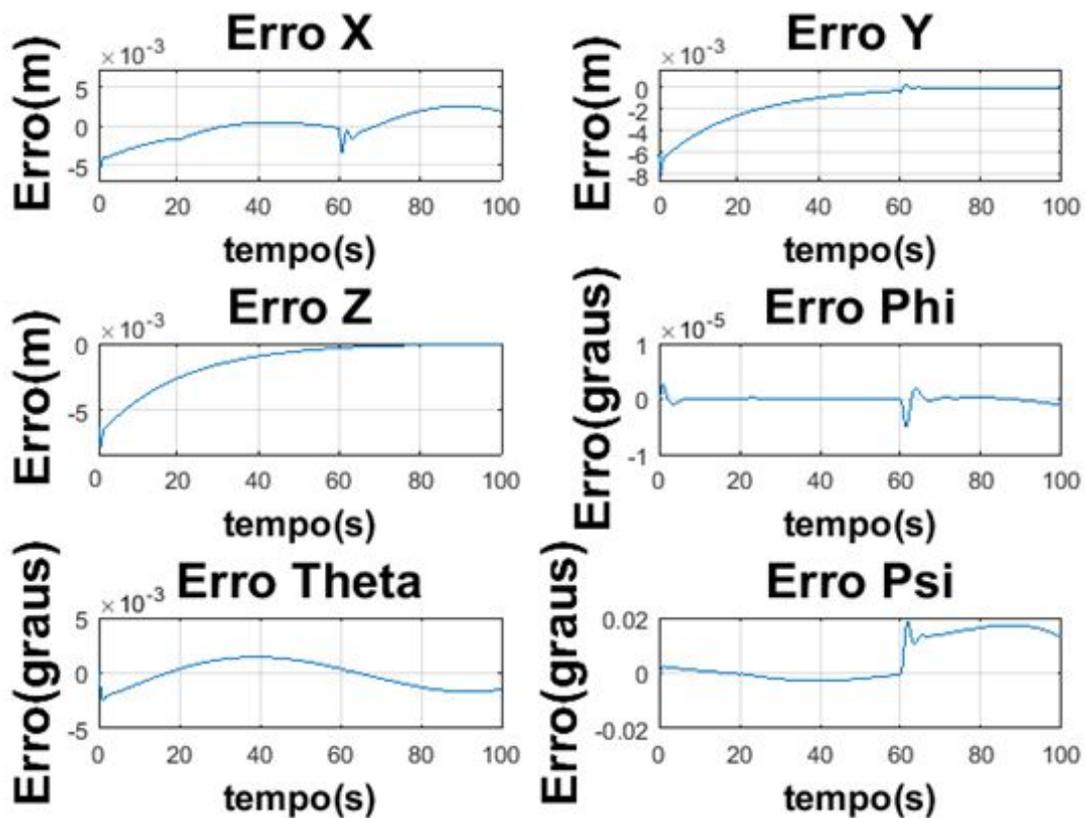


Figura 10.9: Erros da trajetória do veículo Nerov com falha em T1 e falta em T4.
Fonte: O autor.

Observa-se na figura 10.9 que o erro do ângulo ϕ é crescente. Conforme Choi e Kondo (2010), isso é explicado pela ausência de controle do sistema, devido à perda parcial de T1 e total de T4, que influenciam no movimento de guinada que é desenvolvido pelos propulsores horizontais T1, T2, T3 e T4.

Outro fenômeno que pode ser observado são as leves oscilações dos erros nos eixos x e y quando o propulsor T4 entra em falta. Afinal, por mais que o veículo consiga compensar a falta e a falha, ele está sujeito a erros de trajetória no plano horizontal quando mais de um propulsor estiver faltante (Choi e Kondo, 2010).

O erro no eixo z começa com um valor máximo e gradativamente diminui, pois a velocidade desejada é máxima no início da trajetória.

10.1.2 Veículo BA-1

Ocorreram as mesmas condições de falta e falha para o veículo BA-1, em que a falha de 50% no propulsor T1 ocorre no instante $t=20$ s e a falta do propulsor T4 ocorre no instante de tempo $t=60$ s. De acordo com as figuras 10.10 e 10.12, o veículo BA-1 também conseguiu manter o controle da trajetória com erros na ordem de milímetros. Além disso, ao comparar as figuras 10.8 e 10.11 as forças nos propulsores do BA-1 foram superiores às forças desenvolvidas pelo veículo Nerov. Os motivos que levam o veículo Nerov ter esforços menores nos propulsores quando comparado com o veículo BA-1 será explicado na próxima subseção.

Trajetória do Veículo Subaquático

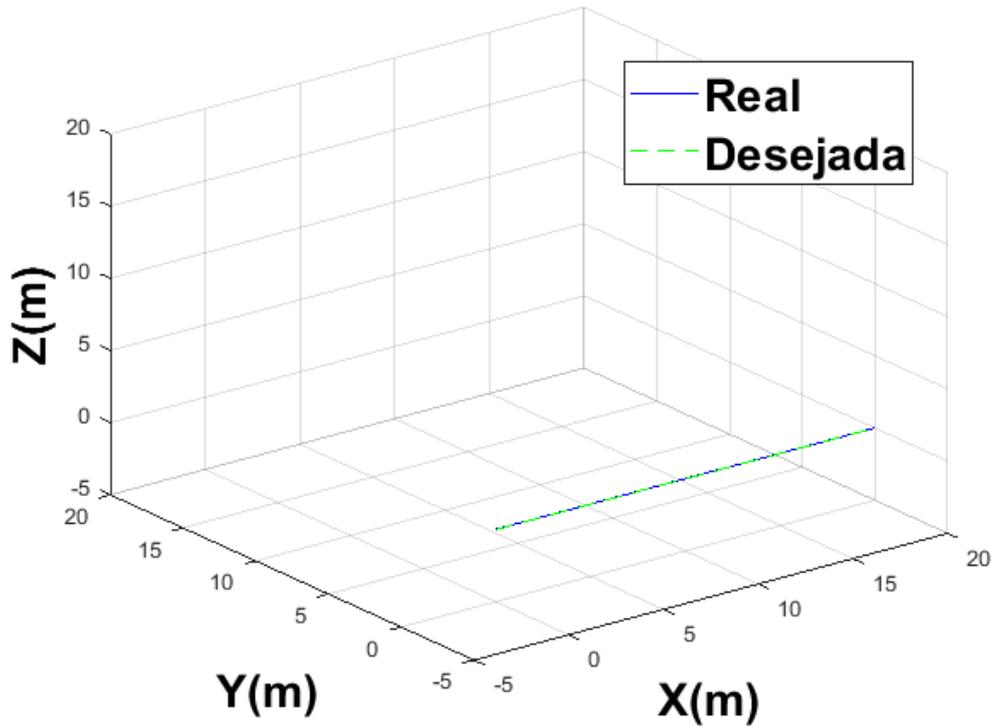


Figura 10.10 Trajetória do veículo BA-1 com falha em T1 e falta em T4.
Fonte: O autor.

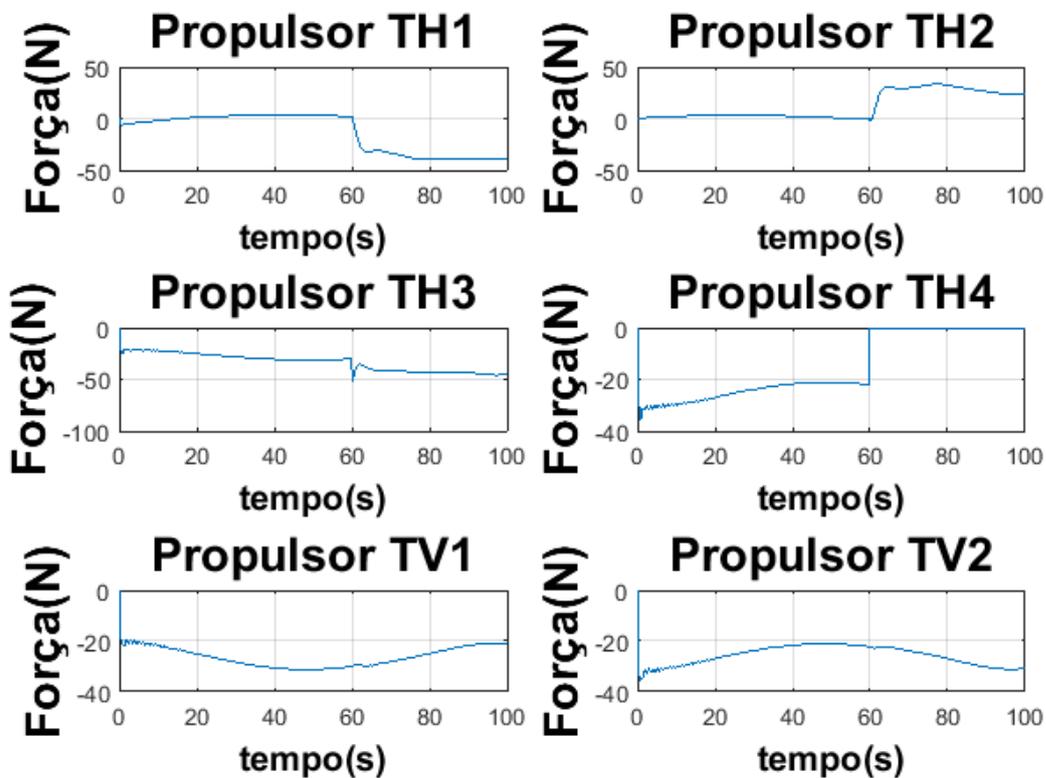


Figura 10.11: Forças nos propulsores do veículo BA-1 com falha em T1 e falta em T4.
Fonte: O autor

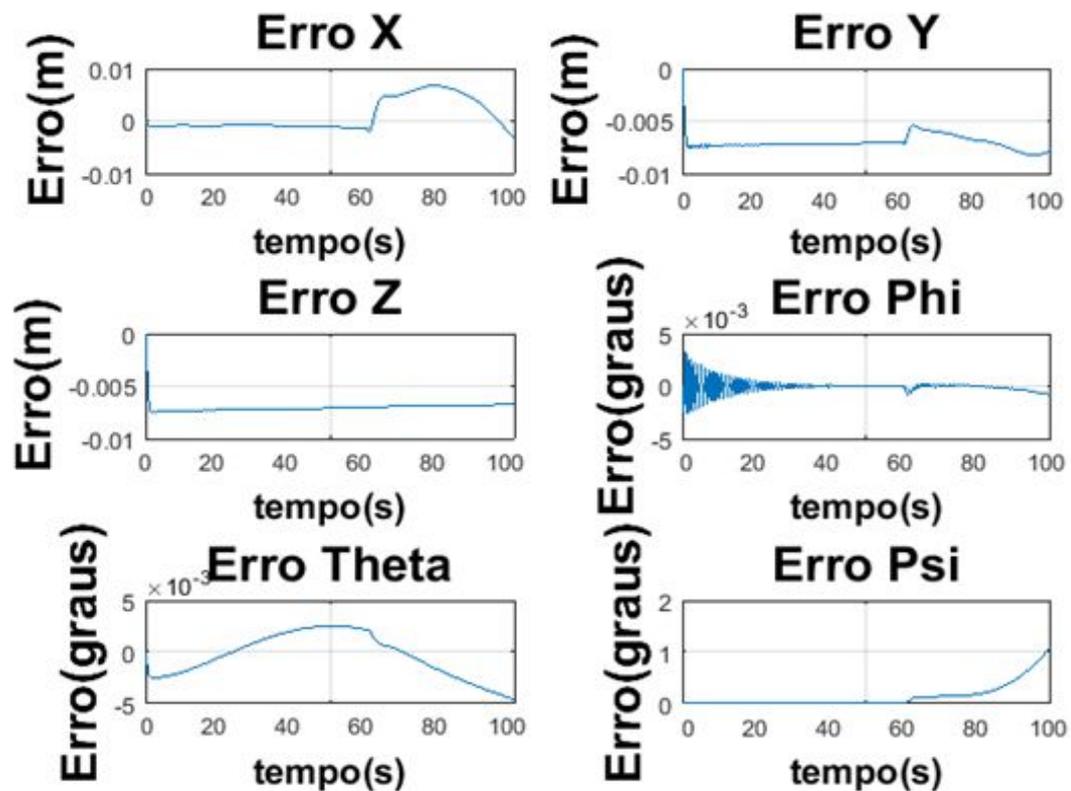


Figura 10.12: Erros da trajetória do veículo BA-1 com falha em T1 e falta em T4.
Fonte: O autor.

10.2 Simulações para as condições falta em T1 e T4

Neste caso, tem-se as faltas ocorrendo em dois propulsores horizontais em planos de ação diferentes (T1 e T4). Com a ocorrência da falta completa dos dois propulsores, comprometeram-se parcialmente os movimentos de guinada e avanço. Esse fenômeno é explicado por Choi e Kondo (2010).

10.2.1 Veículo Nerov

O veículo Nerov não apresentou grandes erros pois, conforme as figuras 10.13 e 10.15, o erro máximo foi de 2 cm no eixo x. Entretanto, houve um aumento do erro do ângulo φ , visto na figura 10.14. Conforme Choi e Kondo (2010) citam, esse erro em φ é plausível, pois o sistema conta com apenas dois propulsores para lidar com o movimento de guinada em um plano com uma correnteza de 0,2 m/s nos três eixos.

Trajetória do Veículo Subaquático

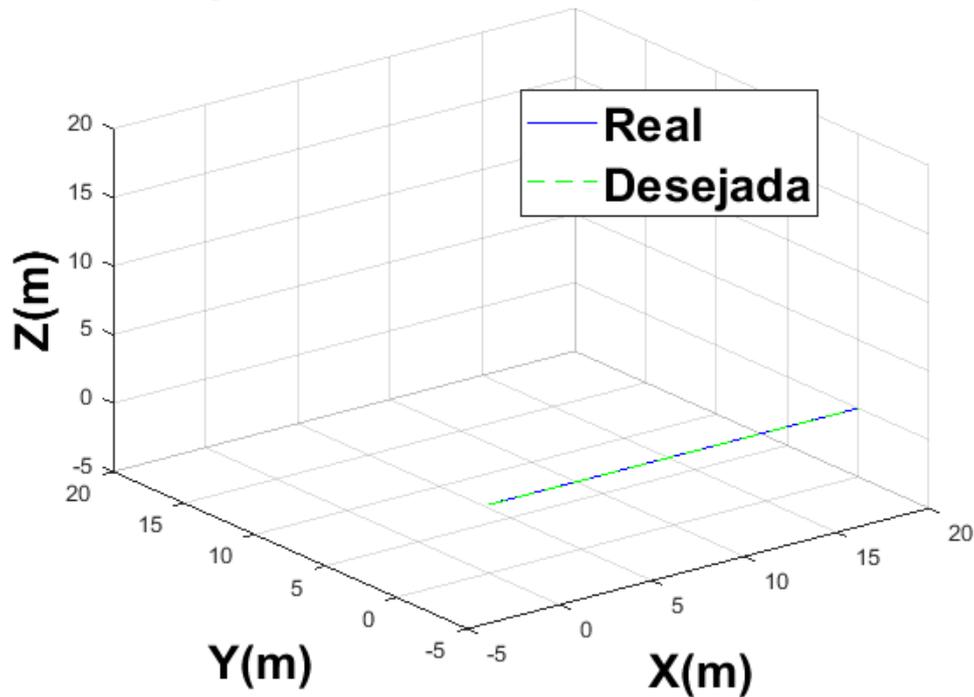


Figura 10.13: Trajetória do veículo Nerov quando T1 e T4 entram em falta.
Fonte: O autor.

Na figura 10.14 são mostradas as forças nos propulsores do veículo em que podem-se observar dois pontos de instabilidade nos propulsores: um no instante $t = 40$ s e outro no instante $t = 60$ s. O pico do primeiro é inferior ao segundo em vista do fato de em $t = 60$ s o posto de B_H se tornar maior que a dimensão de T_H . Ou seja, tem-se o fato do número de propulsores ser menor que o número de forças e momentos resultantes. Assim, existe uma falta de controle considerável nos movimentos de avanço, deriva e guinada.

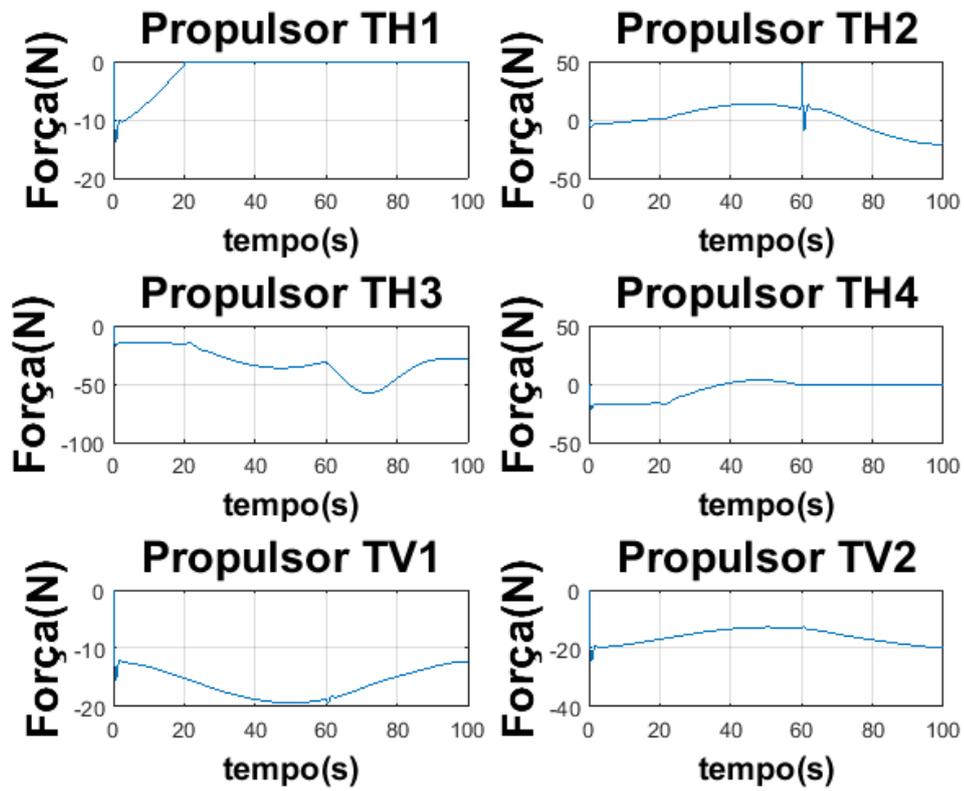


Figura 10.14: Força nos propulsores do veículo Nerov quando T1 e T4 entram em falta. Fonte: O autor.

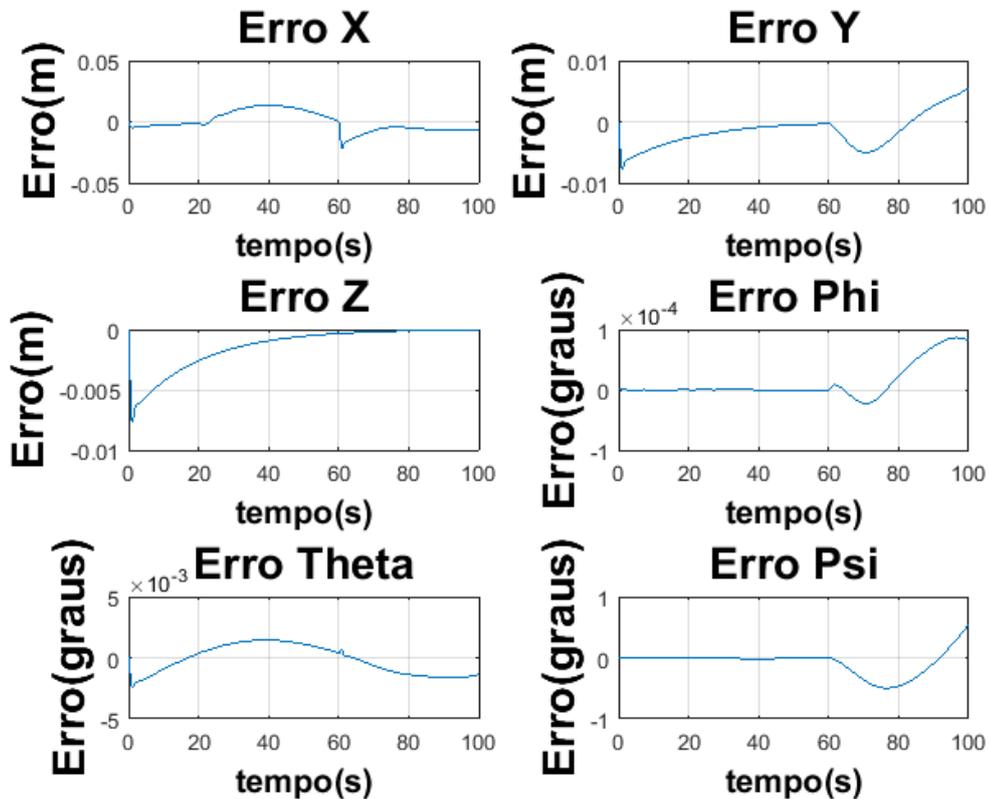


Figura 10.15: Erros do veículo Nerov quando T1 e T4 entram em falta. Fonte: O autor.

10.2.2 Veículo BA-1

Conforme as figuras 10.16 e 10.18, o veículo BA-1 conseguiu manter a trajetória em linha reta no eixo x e obteve um erro máximo de 3 mm no mesmo. Similarmente ao caso do Nerov, obteve-se um erro crescente do ângulo φ pelo mesmo motivo da falta de controle do movimento de guinada desenvolvido pelos propulsores horizontais do veículo.

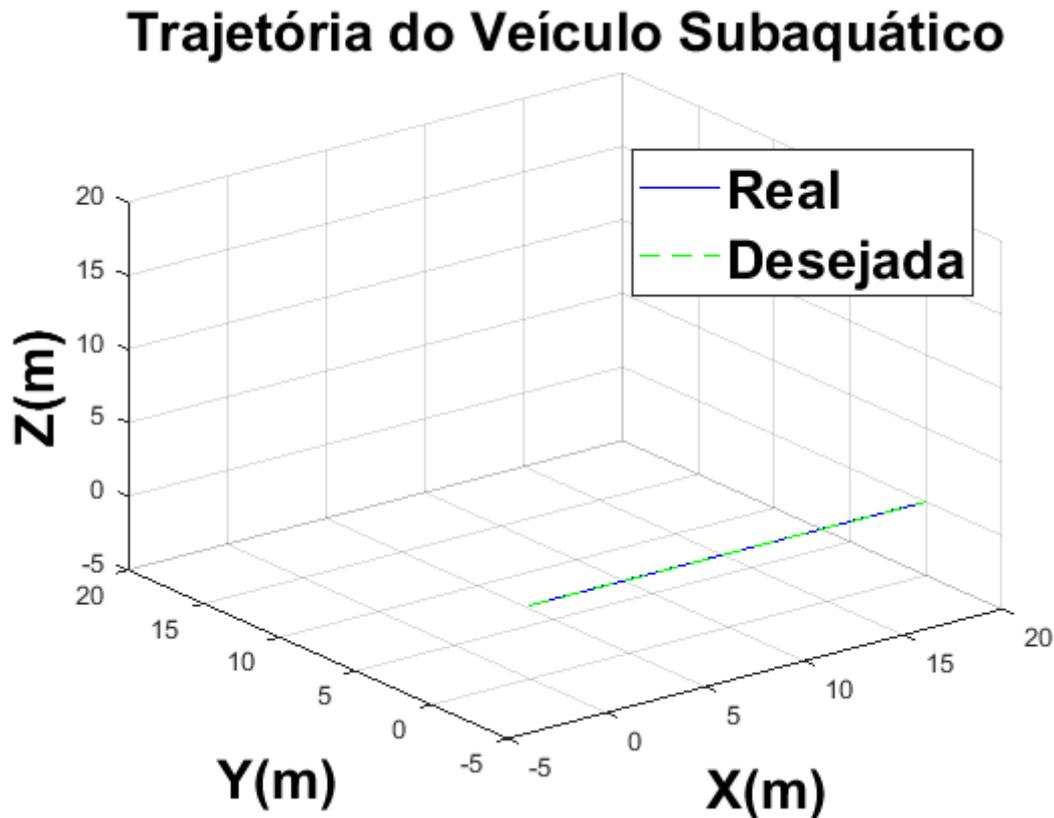


Figura 10.16: Trajetória do veículo BA-1 quando T1 e T4 entram em falta.
Fonte: O autor.

Ao comparar as figuras 10.14 e 10.17, é possível constatar que as forças desenvolvidas pelos propulsores do Nerov são inferiores às forças desenvolvidas pelo veículo BA-1. Isso pode ser explicado pelo fato do veículo Nerov possuir peso, coeficientes de arrasto e de inércia menores que o veículo BA-1. Isso acarreta em menores esforços para locomovê-lo. Por outro lado, comparando as figuras 10.13 e 10.16, observa-se que os erros do BA-1 são inferiores aos erros do Nerov. Isso ocorre também por causa do peso, coeficientes de arrasto e de inércia do veículo BA-1 serem maiores. A velocidade de correnteza de 0,2 m/s nos eixos x , y e z não gera grandes efeitos nesse veículo quando comparado ao veículo Nerov.

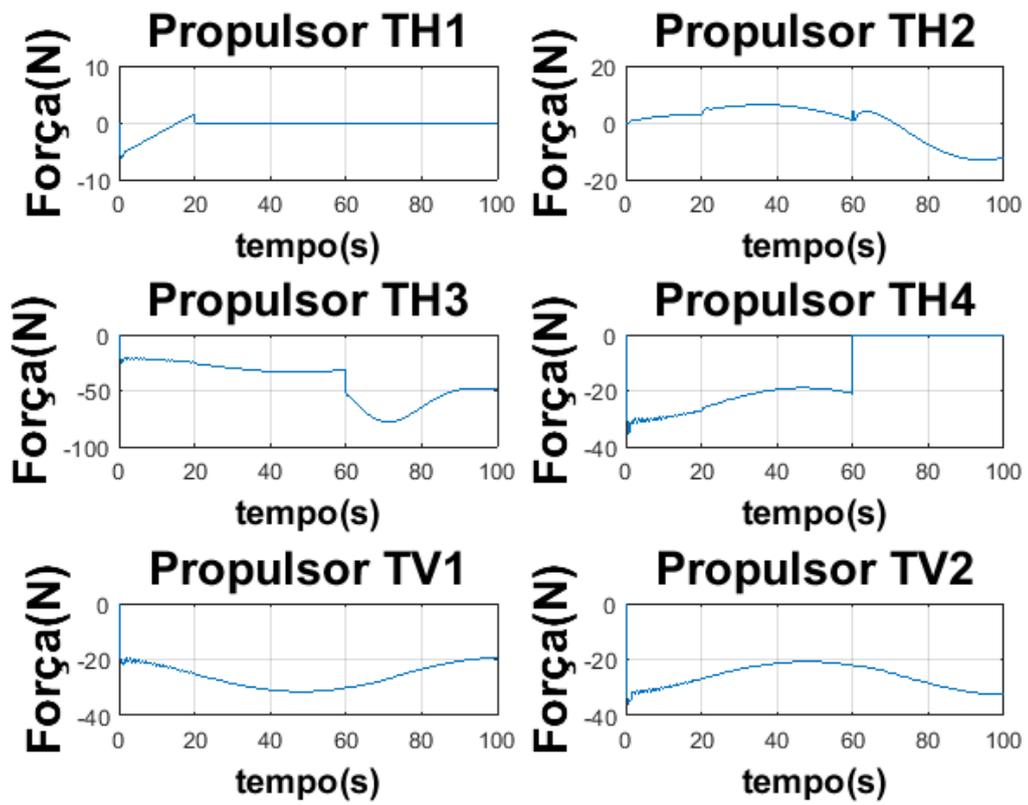


Figura 10.17: Força nos propulsores do veículo BA-1 quando T1 e T4 entram em falta.
Fonte: O autor.

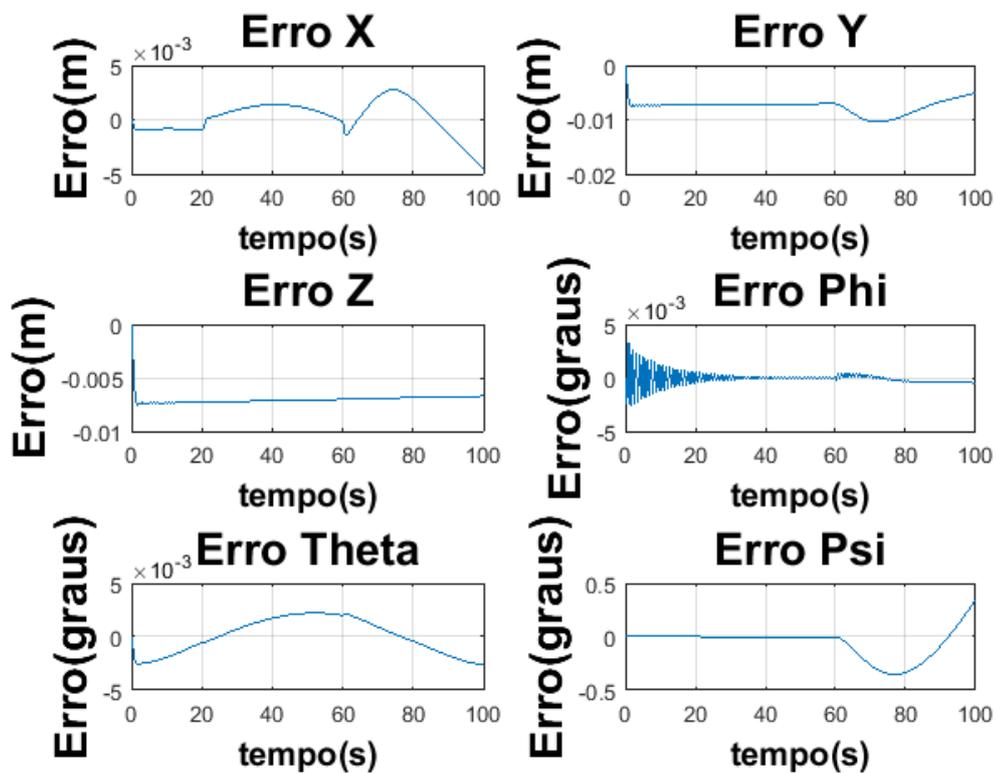


Figura 10.18: Erros de trajetória do veículo BA-1 quando T1 e T4 entram em falta.
Fonte: O autor.

Capítulo 11

11. Conclusões

O objetivo desta dissertação foi desenvolver um CTF aplicando os conceitos de Takagi e Sugeno (1983) para lidar com as faltas dos propulsores de VSA. A utilização da lógica *fuzzy* ocorreu na mimetização dos propulsores faltantes com a finalidade de compensar as faltas nos propulsores que se encontram no mesmo plano de ação.

Mostrou-se que ao somar instantaneamente a força faltante nos propulsores sadios ocasiona-se picos de forças e tensões nos mesmos e no sistema, gerando grandes erros de trajetória e maiores picos no torque total do sistema. Portanto, a utilização de uma máquina de inferência *fuzzy* tende a minimizar o impacto da falta dos propulsores, além de garantir menores gastos de energia, visto que os picos de torque são inferiores. Isso ocorre devido ao CTF desenvolvido levar em consideração não apenas o erro da força dos propulsores, mas também a velocidade do erro da força e a matriz de pesos W_H , que foi modificada conforme a ocorrência da falta (Santos, 2016).

Conseguiu-se modelar matematicamente e programar a cinemática e a dinâmica dos veículos BA-1 e Nerov nos softwares Matlab® e Simulink® partindo do modelo de Santos (2012), além de realizar a simulação numérica de controle de trajetória dos veículos.

Foi possível aliar uma lei de controle por realimentação linearizante com um CTF *fuzzy* Takagi-Sugeno para alocar as faltas dos propulsores horizontais dos veículos em seus respectivos pares no mesmo plano de ação, lidando com as faltas e falhas ocorridas nas simulações.

Os resultados mostraram que a utilização de propulsores virtuais, por meio da conexão de Levi-Civita, mostrou-se viável para o desenvolvimento de um CTF utilizando a lógica *fuzzy* do tipo Takagi-Sugeno.

O CTF desenvolvido apresentou resultados satisfatórios para os casos estudados tanto para as condições de falta quanto para as de falta de 50% dos propulsores. Nessa situação, o VSA Nerov apresentou erros de trajetória similares ao BA-1 que, por sua vez, obteve valores superiores de forças desenvolvidas nos propulsores.

O fato do VSA Nerov ter valores menores peso, coeficientes de arrasto e inércia menores que o VSA BA-1 culminou em menores valores de forças de arrasto, coriolis e centrípeta e restauradoras. Logo, o VSA Nerov precisou de menores esforços nos propulsores para manter a trajetória que esse. Pelo mesmo motivo, a simulação numérica do BA-1 obteve menores erros de trajetória que o Nerov quando houve as faltas nos propulsores T1 e T4.

11.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se o uso da lógica *fuzzy* de Takagi-Sugeno no CTF com ordens superiores e outras funções de pertinência, tais como a curva Z e a função sigmoide, com o intuito de verificar o comportamento sistema. Além disso, sugere-se a aplicação do CTF em outros modelos de veículos subaquáticos.

Referências bibliográficas

- Andrade M., Jacques M. A. P. (2014). Estudo comparativo de controladores de Mamdani e Sugeno para controle do tráfego em interseções isoladas. Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Transportes.
- Bai, Y., Zhuang, H., Wang, D. (2006) *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*.
- Barros, E. A. de. (2013) Poli-USP desenvolve veículo autônomo subaquático. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2013/04/25/poli-usp-desenvolve-veiculo-autonomo-subaquatico-2/>.
- M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki. (2006). *Diagnosis and fault-tolerant control*. control Systems Series, Springer-Verlag London.
- Cardozo, D. I. K. (2013) Projeto de controle de alocação tolerante a faltas para um veículo autônomo subaquático utilizando lógica nebulosa. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
- Carvalho, E. A. (2015). Estudo e implantação de leis de Controle Ótimo e Algoritmos Genéticos aplicados em Veículos Subaquáticos não tripulados utilizados em inspeções de barragens. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2015, 135 p.
- Centeno, M. L. (2007). ROVFURG-II: Projeto e Construção de um Veículo Subaquático Não Tripulado de Baixo Custo. 88p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica. Fundação Universidade Federal de Rio Grande.
- Chen, A. (2015) Here's how much plastic enters the ocean each year. Disponível em: <https://www.sciencemag.org/news/2015/02/here-s-how-much-plastic-enters-ocean-each-year>.
- Chiu, E. (2015). Diver Luke Seabrook died after Nova Scotia Power dam gate left open, brother says. CBC news. Disponível em: <https://www.cbc.ca/news/canada/nova-scotia/diver-luke-seabrook-died-after-nova-scotia-power-dam-gate-left-open-brother-says-1.3172533>
- Choi, J-K. Kondo, H. (2010). *On fault-tolerant control of a hovering AUV with four horizontal and two vertical thrusters*. In: Ocean's 2010 IEEE. Sydney.
- Corradini, M. L., Monteri, A., Orlando, G., (2011). *An Actuator Failure Tolerant Control Scheme for an Underwater Remotely Operated Vehicle*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 19, no. 5,.
- Corradini, M. L., Monteri, A., Orlando G., Pettinari S. (2010). *An Actuator Failure Tolerant Robust Control Approach for an Underwater Remotely Operated Vehicle*, in IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando, FL, USA.

- Fossen, T. I., Balchen, Fossen, J.G. (1991). *The NEROV autonomous underwater vehicle*. In Proceedings of the OCEANS'91 IEEE Conference , pp. 1142-1155.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Willey.
- Fossen, T. I. (2002). *Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*, Marine Cybernetics AS.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, Wiley.
- Fossen, T. I. (2012). *How to incorporate wind, waves and ocean currents in the marine craft equations of motion*, Proceedings of the IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Genova.
- Halliday, D. (2006). Fundamentos de Física: Mecânica, vol1. 7 ed. LTC.
- Jantzen, J. (2007). *Foundations of fuzzy control*. John Wiley & Sons..
- Jiang, J., Yu, X. (2007). *Fault Tolerant Control systems: A Comparative study between active and passive approaches*. Annual Reviews in Control, 36(1), 60-72.
- Köppen-Seliger, B., Frank P. M. (1999). *Fuzzy logic and neural networks in fault detection*, in L. Jain and N. Martin (Eds.), Fusion of Neural Networks, Fuzzy Sets, and Genetic Algorithms, CRC Press, New York, NY, pp. 169-209.
- Kondo H.; Shimizu, E.; Choi J.-K.; Nakane, K.; Matsushima, M.; Nagahashi, K.; Nishida, Y.; Matsui, R. (2010). *Biointeractive autonomous underwater vehicle*, in Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2010 IEEE/OES, pages 1 - 7.
- Mamdani, E. (1974). *Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant*, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 121, n° 12, pp. 1585-1588.
- Mozelli, L. A. (2008). Controle fuzzy para sistemas takagi-sugeno: Condições aprimoradas e aplicações, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Naidu, D. S. (2002) Optimal Control Systems, Idaho State University.
- NASA Content Administrator. Map of Jupiter's South. Nasa, (2007). Disponível em: <https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_539.html>.
- Neto, L. B.; Coelho, P. H. G.; Amaral, J. L. M. do; Mello, M. H. C. S. de. (2006). Minicurso de sistema especialista nebuloso. Xxxviii simpósio brasileiro pesquisa operacional. Pesquisa Operacional na Sociedade: Educação, Meio Ambiente e Desenvolvimento. Goiânia, GO.
- Omerdic, E., Roberts, G. (2004), *Thruster fault diagnosis and accommodation for open-frame underwater vehicles*, in Control Engineering Practice.
- Omerdic, E. (2009). *Thruster Fault Tolerant control: Thruster fault diagnosis and accommodation system for underwater vehicles*. VDM Verlag Dr. Müller.

- Oceaneering. (2011). Disponível em <<http://museum.mit.edu/150/141>>
- Passino, K. M. e Yurkovich, S.. (1998). *Fuzzy Control*, EUA, Addison-Wesley.
- Pedrycz, W.; Gomide, F. (2007). *Fuzzy systems engineering: toward human-centric computing*. New York: WileyIEEE Press.
- Podder, T. K., Antonelli G., Sarkar, N. (2000). *Fault Tolerant Control of an Autonomous Underwater Vehicle Under Thruster Redundancy: Simulations and Experiments*, in International Conference on Robotics & Automation.
- Podder, T. K., Sarkar, N. (1999) *Fault Tolerant Decomposition of Thruster Forces of an Autonomous Underwater Vehicle*, in International Conference on Robotics & Automation.
- Rauber, J., Santos, C.H.F. dos, Chiella, A. B., Motta, L. H., (2012). *A strategy for thruster fault-tolerant control applied to an AUV*, in Methods and Models in Automation and Robotics.
- Rao. G. P., Jayabarathi, R. Semi Autonomous. (2014). *Underwater Surveillance Robot. International Journal of Electronic and Electrical Engineering*. ISSN 0974-2174, Volume 7, Number 1, pp. 13-18.
- Reis, M. Flatfish. (2015). Disponível em: <<http://www.senaicimatec.com.br/projetos/flatfish/>>..
- Ross, Timothy J., (1995). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, McGraw-Hill, New York, 600 pp.
- Ross, Tomothy J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons, Third Edition.
- Santos, C. H .F. dos. (2013) *Fault Tolerant Control Using Virtual Thrusters for An Autonomous Underwater Vehicle*, Technical Report, Western Parana State University.
- Santos, C. H. F. dos, Reginatto, R., Cardozo, D. I. K., De Pieri, E. R. (2016). *Bank of controllers and virtual thrusters for fault-tolerant control of autonomous underwater vehicles*. Article in Ocean Engineering 121:210-223.
- Sarkar, N., Podder, T. K., Antonelli, G. (2002). *Fault-Accommodating Thruster Force Allocation of an AUV Considering Thruster Redundancy and Saturation*, in IEEE Transactions on Robotics & Automation, vol 18, no. 2.
- SNAME (1950), *The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nomenclature for treating the motion of submerged body through a fluid*. Technical Research Bulletin No. 1-5.
- Souza, A. F. D., Garg, V.K., (1984) *Advanced Dynamics: Modeling and Analysis*, in Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Souza, E. C. de,. (2003) Model and Control of Unmanned Underwater Vehicles, Dissertação de Mestado. Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo.

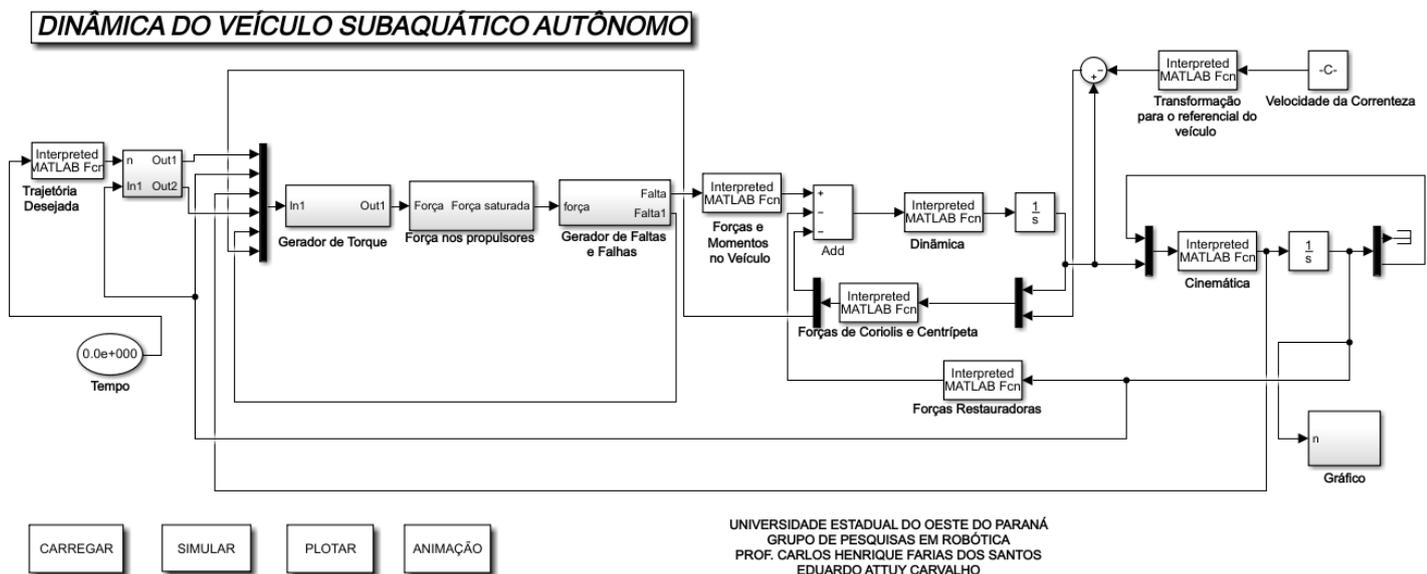
- Soylu, S., Buckham, B. J., Podhorodeski, R. P. (2007). *Robust Control of Underwater Vehicles with Fault-Tolerant Infinity-Norm Thruster Force Allocation*, in *Oceans*.
- Takagi, T. e Sugeno M. (1983) *Derivation of fuzzy control rules from human operator's control action*. *IFAC Symposium on fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis*, Marseille, p. 55- 60.
- Tavares, A. M. (2003). Um estudo sobre a modelagem e o controle de veículos subaquáticos não tripulados, Dissertação de mestrado. Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
- Whitcomb, L. L., Yoerger, D. R., (1995). *Comparative experiments in the dynamics and model-based control of marine thrusters*, in Proc. IEEE/MTS Oceans.
- Worm B., Barbier E. B., Beaumont N., J. Duffy E., Folke C., Halpern B. S., Jackson J. B. C., Lotze H. K, Micheli F., Palumbi S. R., Sala E., Selkoe K. A., Stachowicz J. J., Watson R., (2006). *Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services*. *Science* vol.314, pp.787-790.
- Zadeh, L. A. (1973). *Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-3, No. 1, p. 28-44.
- Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy sets*, *Information and Control* 8,pp.338-353.

Apêndice A

DESCRIÇÃO DO SIMULADOR DESENVOLVIDO NO SOFTWARE MATLAB® JUNTO AO PACOTE SIMULINK®

Neste apêndice é exibido o controlador desenvolvido no ambiente Matlab® aliado ao pacote Simulink®, levando-se em conta o equacionamento feito nos capítulos que vão do 2 ao 9. A estrutura geral do simulador é exibida na figura A.1, onde pode-se subdividir a mesma nos seguintes conjuntos de blocos:

1. Trajetória desejada;
2. Gerador de Torques
3. Força nos propulsores
4. Gerador de Falhas e Falhas
5. Forças e momentos no Veículo
6. Dinâmica
7. Forças de Coriolis e Centrípeta
8. Forças restauradoras
9. Cinemática
10. Velocidade da Correnteza



A.1: Estrutura geral do simulador. Fonte: O autor.

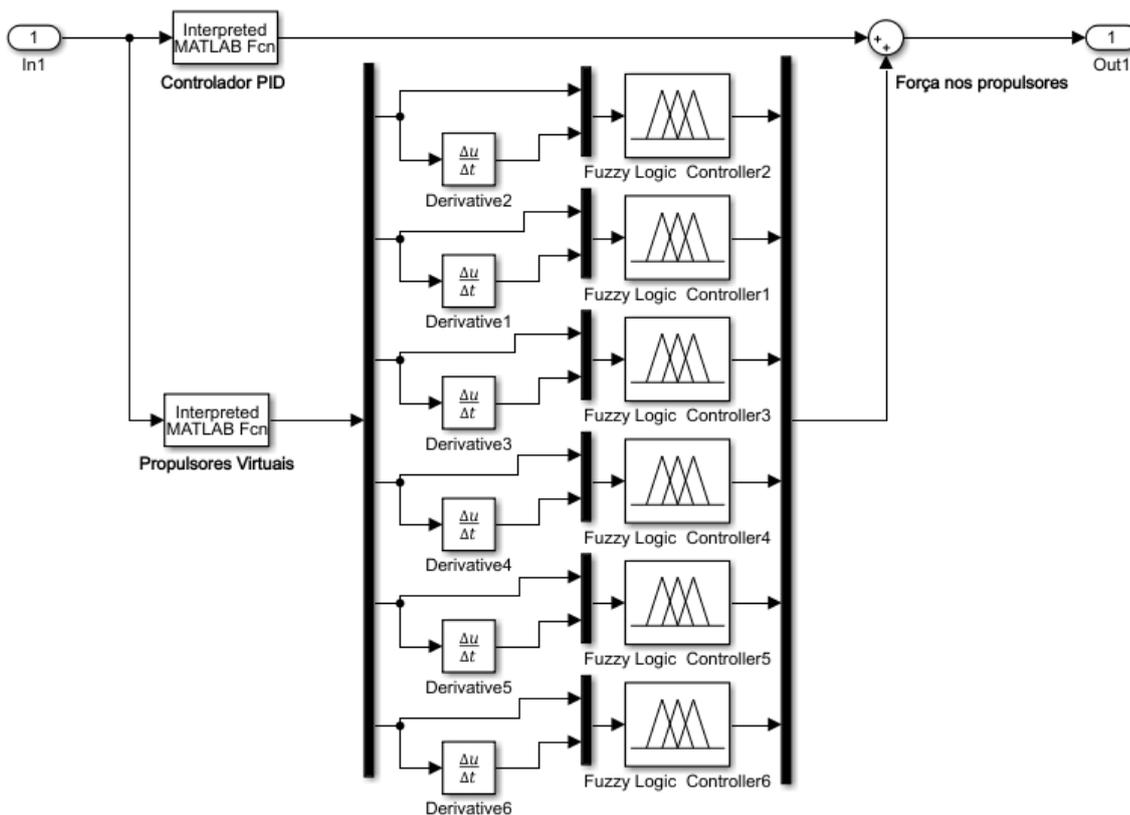
O bloco gerador de trajetória é responsável por fornecer os valores de posição (η_d), velocidade ($\dot{\eta}_d$) e aceleração ($\ddot{\eta}_d$) em cada instante de tempo da simulação. Isso ocorre por meio de uma função que, conforme citado no capítulo 10, opera com polinômios de quinta ordem que fazem o vetor de velocidades desejadas $\dot{\eta}_d$ ser nulo nos instantes iniciais e finais

da trajetória do veículo (Cardozo, 2013). A descrição matemática dessa função de quinta ordem pode ser vista em Carvalho (2015).

Tem-se a junção de 48 sinais na entrada bloco Gerador de torque, que são respectivamente:

- Entradas de posição, velocidade e aceleração desejadas;
- Posição real;
- Velocidade real;
- Integral do erro de posição;
- Condição de falta e falha de cada propulsor;
- Velocidade da correnteza.

A junção dos sinais acima entra no sub-bloco gerador de torque e, conforme explicado no capítulo 9, realiza-se a mimetização dos propulsores por meio dos propulsores virtuais aplicando a lógica *fuzzy* de Takagi-Sugeno. Para isso, leva-se em consideração erro do torque do propulsor faltante e a derivada de primeira ordem do mesmo. Na saída do sub-bloco, tem-se as forças nos propulsores.



A.2: Bloco gerador de torques. Fonte: O Autor.

O sinal de forças nos propulsores, oriundo do sub-bloco gerador de torques, entra no sub-bloco força nos propulsores, visto na figura A.3, onde é separa-se o sinal para cada propulsor.

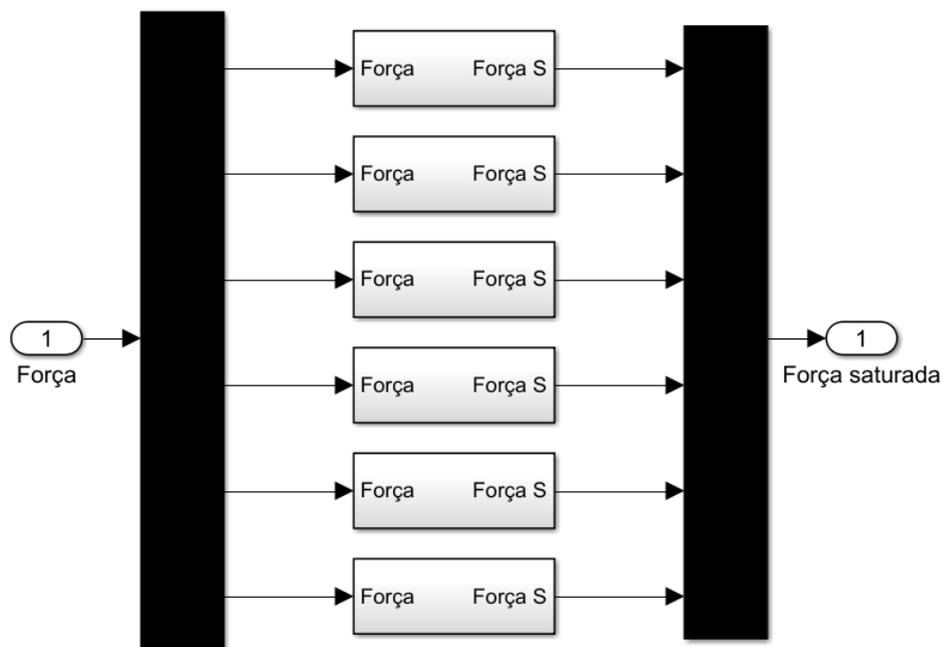


Figura A.3: Sub-bloco Força nos propulsores.
Fonte: O Autor.

Em cada sub-bloco é realizado o equacionamento matemático descrito no capítulo 4 para verificar a tensão elétrica nos propulsores. Conforme pode-se observar na figura A.4, utilizou-se um bloco de saturação, o qual garante que a tensão não seja nem superior a 24V nem inferior a -24V. Em seguida, realiza-se inversamente o mesmo equacionamento matemático para obter-se a força saturada em cada propulsor.

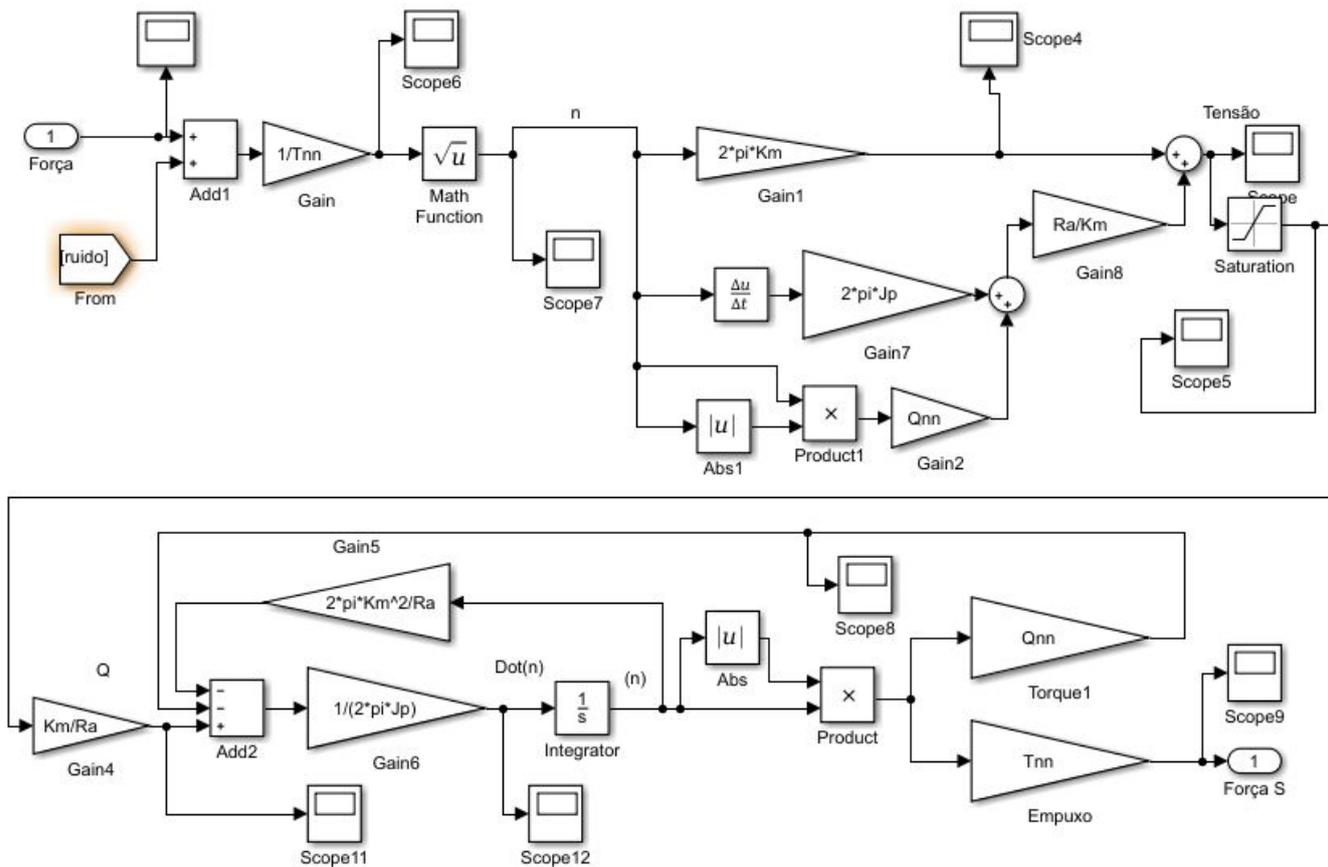


Figura A.4: Estrutura do bloco de saturação das forças nos propulsores.
Fonte: Próprio Autor.

Em seguida, o sinal da força saturada entra no sub-bloco gerador de faltas, em que, nos instantes de tempo $t = 40s$ e $t = 60s$, as forças nos propulsores 1 e 4 sofrem modificações.

Para realizar a simulação de falta nos dois propulsores, desenvolveu-se o gerador de faltas mostrado na figura A.5. Nele, utilizou-se o bloco repetidor de sequência em conjunto com o bloco interruptor para realizar o desligamento dos propulsores. Os sinais que saem deste sub-bloco são: a força com a ocorrência da falta, conforme o instante de tempo, e o sinal de desligamento, que é realimentado no sub-bloco gerador de torque.

Para a simulação de falha no propulsor 1 e falta no propulsor 4, realizaram-se algumas modificações no sub-bloco gerador de faltas. Primeiramente, utilizou-se o sub-bloco multiplicador com um ganho de 0,5, visando simular a falta de 50%. Em seguida, ligou-se um bloco de saturação na saída do multiplicador com o objetivo de garantir que a força no propulsor com falha não ultrapassasse a capacidade reduzida do propulsor (-50N à 50N).

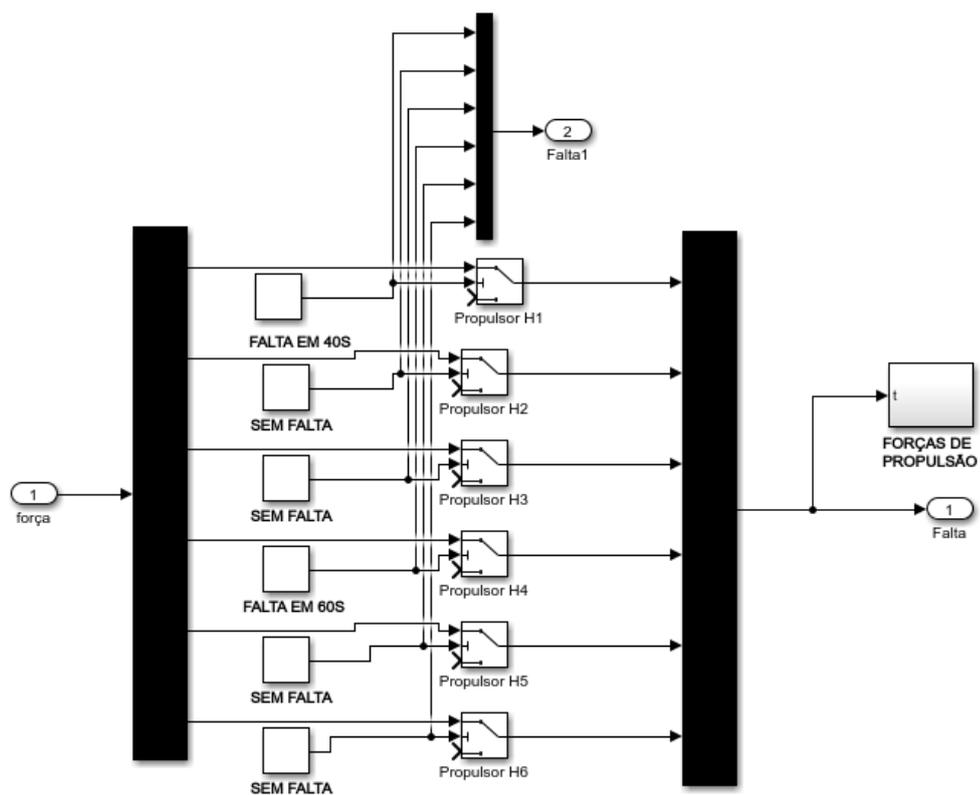


Figura A.5: Gerador de faltas nos propulsores 1 e 4.

Fonte: O Autor.

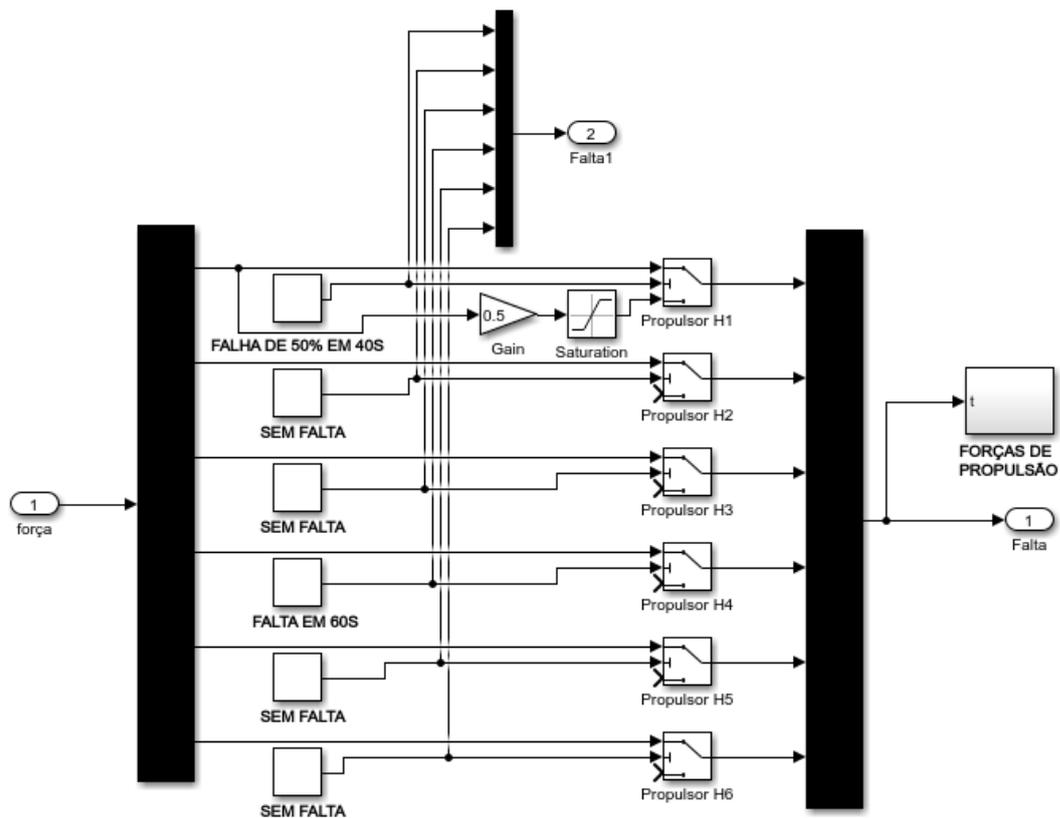


Figura A.6: Gerador de falha de 50% no propulsor 1 e falta no propulsor 4.
Fonte: O Autor.

Em seguida, as forças saturadas e com falhas e/ou falhas nos propulsores são transformadas em forças e momentos nos eixos x , y e z por meio do bloco forças e momentos do veículo. Ao final, tem-se as equações de cinemática e dinâmica do veículo subaquático que geram a posição, a velocidade e a aceleração reais do veículo, as quais são realimentadas no controlador.